

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 2 (30)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2015**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — Вып. 2 (30). — 235 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 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

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



СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

- Махин В. П., Страшко А. Н.* Математическое моделирование движения судов во льдах 7
- Гуща И. А.* Характеристика погрешностей систем навигационного комплекса, вырабатывающих скоростную информацию 12
- Коптев А. В.* Исследование влияния подводного течения на динамику корабля 16
- Осокина Е. Б., Оськин Д. А., Дыда А. А.* Адаптивная идентификация параметров судна на основе простых моделей 24
- Дорожко В. М.* Опрокидывание контура морского судна «волной-убийцей» 31
- Ермаков С. В.* Математическая модель маневра последнего момента с пассивным фактором 41
- Маринич А. Н., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М.* Цифровые информационные потоки в судовых интегрированных системах навигации и системах связи 48
- Решняк В. И., Каляуш А. И.* Исследование работы адсорбционных фильтров в установках для очистки нефтесодержащей подсланевой воды 57

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 61

- Гарибин П. А., Субботин М. В.* Экспериментальные исследования сквозного волнозащитного сооружения с камерой гашения 61
- Селиверстов С. А., Селиверстов Я. А.* Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта 69

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 81

- Сухотерин М. В., Барышников С. О., Потехина Е. В.* О расчетах пластин по сдвиговым теориям 81
- Нагиев Ф. Б., Исмаилов З. О.* Обтекание судна пузырьковой морской водой 89
- Наумов В. С., Кочнева И. Б.* Идентификация материалов при обеспечении требований безопасной утилизации судов 98
- Ивановская А. В.* Формализация динамики механической системы «судно – ваер – трал» в переходном режиме 106
- Горохов М. С., Роннов Е. П.* Определение массы корпуса железобетонного стоечного судна на стадии исследовательского проектирования 113
- Купальцева Е. В.* Анализ проектных характеристик главных элементов пассажирских судов для внутригородских и пригородных линий 119

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 127

- Авдеев Б. А., Масюткин Е. П., Просвирнин В. И.* Моделирование процесса коагуляции в криволинейном потоке в масляных системах судовых энергетических установок 127
- Шабанов В. А., Наумова А. К., Васильев К. А.* Использование лапласиана при фильтрации изображений визуальной оценки поверхностей элементов судовой вентиляции из композитов 133

выпуск **2(30)**
2015

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

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

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТЕ	141
<i>Кузнецов А. Л., Галин А. В. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке</i>	141
<i>Лаврентьева Е. А., Плотникова А. И. Научные подходы к сущности управления налоговыми рисками в судоходной деятельности</i>	154
<i>Андреева М. Ю. Северный морской путь в политике экономического прорыва России: некоторые оценки и предпосылки</i>	164
<i>Крайнова В. В. Совершенствование систем калькулирования себестоимости перевозок в управленческом учете судоходных компаний</i>	171
<i>Пухальский В. А. Классификация и формирование конкурентных преимуществ портов</i>	179
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	185
<i>Григорьев А. В., Глеклер Е. А. Компьютерное моделирование и исследование единой электроэнергетической системы в среде Simulink</i>	185
<i>Труднев С. Ю. Разработка компьютерной модели параллельной работы генераторного агрегата и трехфазного безынерционного источника питания</i>	191
<i>Родимов Н. В. Анализ систем повышения качества электрической энергии при активной фильтрации гармонических искажений сети</i>	198
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ	208
<i>Андрюшечкин Ю. Н., Каретников В. В., Яснов А. П. К вопросу использования современных информационных технологий для обеспечения безопасности судоходства на внутренних водных путях России</i>	208
<i>Бухарметов М. Р., Теплов Э. П. Защита графических документов путем встраивания полухрупких цифровых водяных знаков на основе модуляции яркости</i>	213
<i>Попов Б. Н., Федорина Е. С. Применение методов анализа и обработки данных к информационным потокам объектов водного транспорта</i>	220
<i>Шахнов С. Ф. Функциональная устойчивость параметров речных локальных дифференциальных подсистем автоматизированных систем управления движением судов</i>	225

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	7
<i>Mahin V. P., Strashko A. N.</i> Mathematical modeling of movement of vessels in ice	7
<i>Gushha I. A.</i> Characterization of errors in navigating complex systems that produce high-speed information	12
<i>Koptev A. V.</i> Research of influence of underwater current on the dynamics of the ship	24
<i>Osokina E. B., Oskin D. A., Dyda A. A.</i> Simple modles based on adaptive identification of ship parameters	31
<i>Dorozhko V. M.</i> Capsizing of seagoing vessel contour due to «rogue wave»	41
<i>Ermakov S. V.</i> Mathematical model of last moment maneuver with passive factor	48
<i>Marinich A. N., Pripotnjuk A. V., Ustinov Ju. M.</i> Digital information streams in the ship integrated systems of navigation and communication systems	57
<i>Reshnjak V.I. Kaljaush A.I.</i> Investigation work adsorption filters in installations for cleaning oily bilge water	61
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	61
<i>Garibin P. A., Subbotin M. V.</i> Experimental research of open protective structure with stilling basin	69
<i>Seliverstov S.A., Seliverstov Ja.A.</i> Modeling of traffic flows megapolis with introduction of new water types of passenger transport interacity	81
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	81
<i>Suhoterin M. V., Baryshnikov S. O., Potehina E. V.</i> On settlement plates in shear theories	89
<i>Nagiev F. B. Ismailov Z. O.</i> Bubble seawater flow around ship	98
<i>Naumov V. S. Kochneva I. B.</i> Identification of the material to meet the requirements of safe ship recycling	106
<i>Ivanovskaja A. V.</i> Formalization of dynamics mechanical system a «ship-dragrope-trawl» in transient condition	113
<i>Gorohov M. S., Ronnov E. P.</i> Definition of the mass of reinforced concrete stationary vessel hull at the stage of research designing	119
<i>Kupalceva E. V.</i> Analysis of the design characteristics of the main elements of inland vessels	127
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	127
<i>Avdeev B. A., Masjutkin E. P., Prosvirnin V. I.</i> Modeling of coagulation process in the curvilinear flow in the oil system of ship power plants	133
<i>Shabanov V. A., Naumova A. K., Vasilev K. A.</i> The use of laplacian filtering images for the visual evaluation of surface elements of shipboard ventilation of composites	141
ECONOMICS AND MANAGEMENT OF TRANSPORT	141
<i>Kuznecov A. L. Galin A. V.</i> The genesis of port development models in modern transportation science	154
<i>Lavrenteva E. A., Plotnikova A. I.</i> A scientific approach to tax risk management in shipping	164
<i>Andreeva M. Ju.</i> Some aspects and assessment of NSR as a way of economic rising of Russia	171
<i>Krajnova V. V.</i> Improving systems of calculation cost of transportation in management accounting shipping companies	179
<i>Puhalskij V. A.</i> Ports competetive advantages classification and development	

edition **2(30)**
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.

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 185

Grigorev A. V., Glekler E. A. Computer simulation and research of the integrated
electric power system in Simulink 185
Trudnev S. Ju. Development of computer model of parallel operation
of the generating unit and three-phase non-inertial power supply 191
Rodimov N. V. Analysis of improving the quality of electrical energy
at active filtering of harmonic distortion of network 198

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 208

Andrjushechkin Ju. N., Karetnikov V. V., Jasnov A. P. On the question
of the use of modern information technology for navigation safety
on inland Russian waterways 208
Buharmetov M. R., Teplov Je. P. Graphic documents protection by embedding
a digital watermark based brightness modulation 213
Popov B. N., Fedorina E. S. Using of methods for analysis and processing data
to an information flows for objects of water transport 220
Shahnov S. F. Functional stability parameters of the river local differential
subsystems of automated control system vessel traffic 225

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК 629.5.073.4

В. П. Махин,
канд. техн. наук, доц.;

А. Н. Страшко,
канд. техн. наук, доц.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

MATHEMATICAL MODELING OF MOVEMENT OF VESSELS IN ICE

В работе приведены результаты численного моделирования ледовой ходкости судна во льдах различного характера и толщины. Выявлен характер ледового сопротивления судна в различных условиях плавания. Представлены графики расчетных величин в сравнении с экспериментальными данными. При этом основные коэффициенты пропорциональности и степени определяются методом подбора с использованием данных эксперимента с учетом независимости гидродинамических сил сопротивления воды и сил сопротивления льда. Выполненные исследования отнесены к движению судна в ровном льду со слабым торошением. Показано, что расчётная ледовая категория судна не всегда соответствует установленному ледовому классу, что повышает риск ледовой аварийности. Сделаны выводы о применимости методики численного моделирования при разработке нормативных документов, регламентирующих ледовое плавание судов. Указано на необходимость учета особых свойств льда в Финском заливе.

The results of numerical modeling of the different kinds of ice propulsion ability of a ship indicated in the paper. Revealed the nature of the ice resistance of a vessel in a variety of sailing conditions. Schedules of settlement sizes in comparison with experimental data are presented. Thus the basic coefficients of proportionality and degree we will define a trial and error method, using the experiment data. Independence of hydrodynamic forces of a water drag and ice drag forces is assumed. The fulfilled researches have been referred to vessel movement in equal ice, with weak hummocking.

It is shown that the estimated ice category of the vessel often does not meet government ice class, which increases the risk of ice accidents. It is shown that the settlement ice class of vessel not always corresponds to the established ice class that raises risk of ice breakdown susceptibility. Conclusions are drawn on applicability of a technique of numerical modelling by working out of the standard documents regulating navigation in ice of ships. Necessity of the account of special characteristics of ice for the Gulf of Finland is specified.

Ключевые слова: судно, ледовые качества, ледовая ходкость, максимальный упор винта, сопротивление льда, торможение и разгон судна.

Key words: vessel, ice performances, ice propulsion ability, the maximum thrust of the propeller, ice resistance, breaking and acceleration of the ship.



ЕСМОТРЯ на легкие ледовые условия в Финском заливе сезона зимы 2014 – 2015 гг. следует помнить о суровых предшествующих зимах и о большой вероятности повторения такой ледовой обстановки. Были зимы, когда в Финском заливе до 200 судов простаивали в ожидании ледовой проводки, что сопровождалось потерями ходового времени, срывом планов перевозки грузов и, как следствие, огромными убытками. С одной стороны, это явилось следствием недостатков организации ледового обеспечения бассейна Балтийского моря, а с другой — просчетов в обеспечении необходимых ледовых качеств судов, а также недостаточного учета свойств ледового покрова в Финском заливе, особенно в весенний период. В то же время следует помнить о том, что существует вероятность наступления настоящих суровых зим, сведения о которых содержат уникальные материалы наблюдений за ледовым покровом, выполненные в 40 – 70-е гг. XX в. С учетом ранее изложенного, в работе предприняты попытки создать математический аппарат,

позволяющий выполнить необходимые расчеты по определению сопротивления льда движению судна.

При моделировании движения судна во льду можно использовать систему уравнений для движения судна с переложным рулём на свободной воде [1], [2]. Для этого при рассмотрении прямолинейного движения судна во льду как частного случая движения с переложным рулём достаточно видоизменить первое уравнение этой системы, исходя из предположения о независимости гидродинамических сил сопротивления воды и льда. Данное предположение позволяет ограничиться добавлением в первое уравнение системы выражения для сопротивления льда и видоизменить расчёт упора винтов.

Полагая сопротивление льда пропорциональным его толщине и скорости движения судна во льду, определим сопротивление льда как

$$R_i = k_i \cdot h_i^m \cdot V_i^n, \quad (1)$$

где k_i — коэффициент пропорциональности; h_i — толщина льда; V_i — скорость судна во льду.

Коэффициент пропорциональности k_i и степени m, n определим методом подбора, используя данные эксперимента.

Расчёт упора винтов меняем следующим образом. В рассматриваемой модели, создаваемой для расчёта движения судна на циркуляции, упор винта рассчитывается двумя составляющими:

$$T = \frac{n_i^2 W}{V} \left[(0,885 - 0,00115) \frac{2\pi n}{60} \cdot \sqrt{L} \right] + k_{s1} (V_{\text{н}} - V_i), \quad (2)$$

где T — упор винта, Н; W — номинальная пропульсивная мощность, кВт; V — скорость на свободной воде при номинальной мощности, м/с; n — обороты винта при номинальной мощности, об/мин; n_i — обороты винта в расчётном маневре, об/мин; L — длина судна, м; $V_{\text{н}}$ — начальная скорость в расчётном маневре, м/с; V_i — текущая скорость в маневре, м/с; k_{s1} — коэффициент, учитывающий изменение упора на циркуляции.

Первая составляющая определяет упор винта на скорости свободного хода, вторая — учитывает рост упора на циркуляции судна в связи с падением скорости при криволинейном движении. Коэффициент k_{s1} определяется по данным циркуляции на ходовых испытаниях, имеющимся на судах в виде, регламентированном ИМО для информации о маневренных характеристиках.

При движении судна во льду с оборотами, равными оборотам на свободной воде, требуется дополнительная мощность на преодоление сопротивления льда. Для судов ледового плавания и ледоколов введена такая характеристика, как льдопроходимость, представляющая собой максимальную толщину льда, которую сможет преодолеть судно с определённой скоростью. При движении во льду, характерном для его льдопроходимости, необходим максимальный упор, обеспечиваемый максимальной пропульсивной мощностью силовой установки. Упор при этом близок к упору на швартовых. Если предположить, что необходимый дополнительный упор на преодоление сопротивления льда линейно зависит от скорости движения во льду и меняется от максимального (при характерной для льдопроходимости этого судна толщине льда) до упора при движении на свободной воде, то его можно аналитически выразить следующим образом:

$$T_{\text{доп}} = k_p \left(\frac{n_i}{n} \right)^2 \left[0,885 - 0,00115 \frac{2\pi n}{60} \sqrt{L} \right] \cdot \frac{V - V_i}{V}, \quad (3)$$

где k_p — коэффициент, учитывающий изменение упора на скорости льдопроходимости.

Таким образом, при скорости движения, близкой к скорости льдопроходимости, суммарный упор в первом уравнении системы будет близок к упору на швартовых. С ростом скорости движения до скорости на свободной воде дополнительный упор $T_{\text{доп}}$ винта приближается к нулю и значение упора винта в уравнении приближается к упору на свободной воде, что соответствует реальности.

Используя выражение (1) для расчёта сопротивления льда, по экспериментальным данным пассивного торможения судна «Борис Бувин» во льду определялись методом подбора k_p , m , n . Таким образом, получено выражение для сопротивления льда данному судну:

$$R_i = 0,1 D h_i^{1,2} V_i^{0,2}, \quad (4)$$

где R_i — сопротивление льда движению судна, Н; D — водоизмещение судна с учётом присоединённых масс, кг.

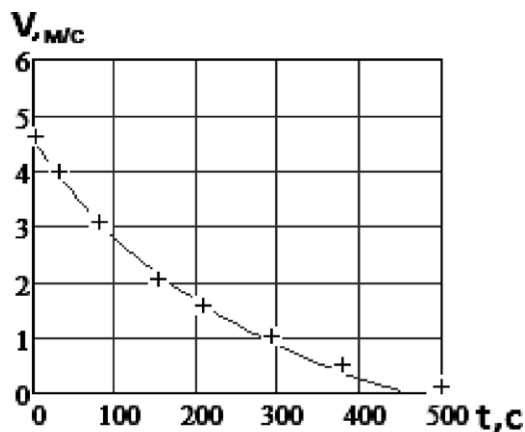


Рис. 1. Пассивное торможение во льду толщиной 0,10 – 0,15 м т/х «Борис Бувин»

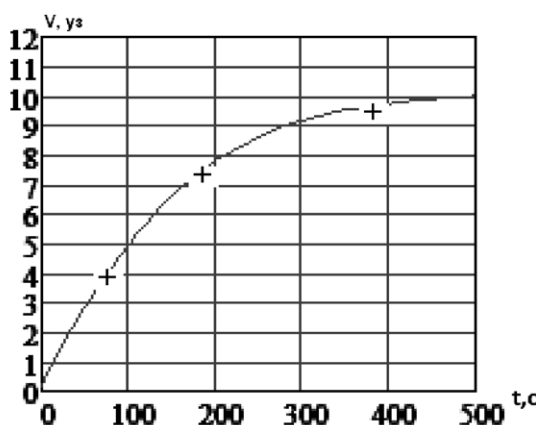


Рис. 2. Разгон неподвижного судна во льду толщиной 0,10 – 0,15 м до 9,2 уз (110 об/мин)

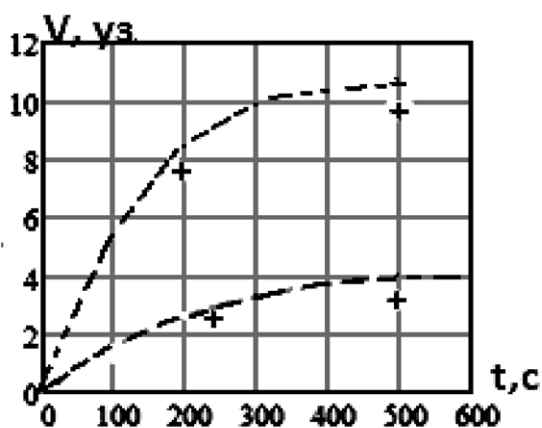


Рис. 3. Разгон во льду толщиной 0,15 м на малом — 75 об/мин (нижняя кривая) и среднем — 121 об/мин (верхняя кривая) ходу

На рис. 1 приведено сравнение результатов расчёта пассивного торможения судна «Борис Бувин» с экспериментом при сопротивлении льда R_i . Торможение во льду толщиной 10 – 15 см, со скоростью 9,2 уз (113 об/мин). Сплошной линией показаны результаты расчёта, крестиками — экспериментальные точки.

Полученное выражение для сопротивления льда далее использовалось для определения коэффициента k_p , учитывающего рост упора винтов на скорости льдопроходимости. Для определения значения этого коэффициента использовались эксперименты по разгону судна во льдах. Для т/х «Борис Бувин» наилучшее совпадение расчётных и экспериментальных данных соответствует коэффициенту, равному 0,3. Это значит, что на скорости, близкой к скорости льдопроходимости, упор его винтов увеличивается на 30 %.

На рис. 2 приведены результаты расчёта разгона с полученным ранее выражением для сопротивления льда и полученным коэффициентом k_p . Сплошной линией показаны результаты расчёта, на которую нанесены экспериментальные точки.

На рис. 3 приведены результаты расчёта скорости движения данного судна на режимах малого (75 об/мин) и среднего (121 об/мин) хода, т. е. на режимах движения, которые не рассматривались при определении параметров для расчёта сопротивления льда и определении коэффициента k_p . Пунктирными линиями показан расчёт скорости, крестиками нанесены экспериментальные точки. Из рисунка видно, что качественно расчёт соответствует экспериментальным данным. Необходимо отметить, что выполненные исследования относятся к движению судна в ровном льду, со слабым торошением. При движении в битом смёрзшемся льду, движении за буксиром, ледоколом в пробитых каналах, заполненных льдом, особенно на малом ходу, сопротивление льда будет иным, и требуются дополнительные исследования. Полученные результаты позволяют, например, рассчитать для определённых типов судов скорости движения во льду разной толщины при разных режимах движения.

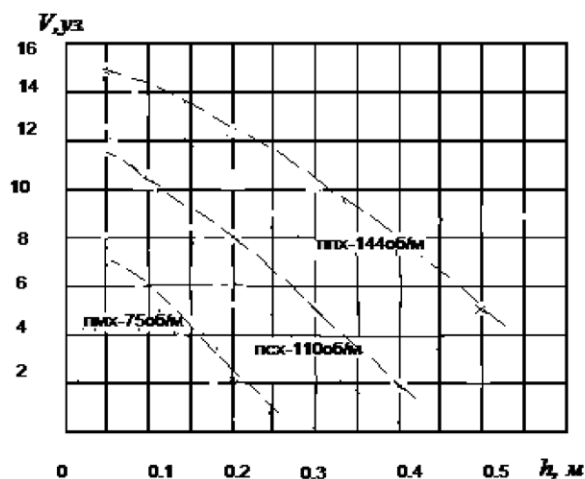


Рис. 4. Скорость движения судов типа «Иван Скуридин» в ровном льду разной толщины

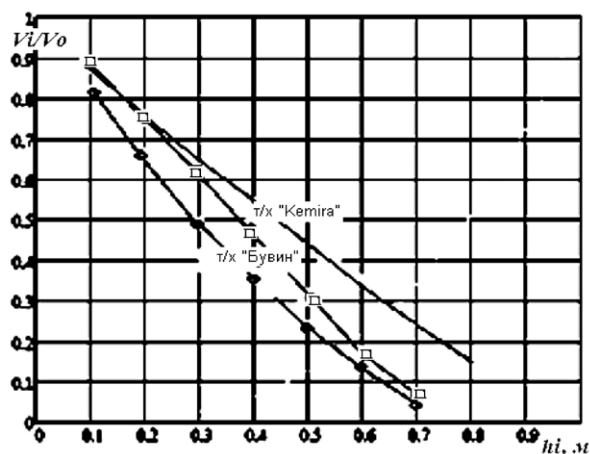


Рис. 5. Сравнение результатов расчёта кривых $V_i/V_0 = f(h_i)$ для танкера «Sotka» с определением ледового сопротивления двумя способами (крестиками отмечена кривая, рассчитанная по предлагаемой модели)

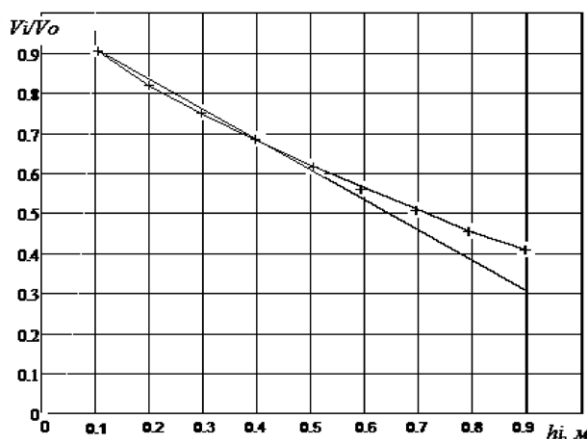


Рис. 6. Сравнение результатов расчёта кривых $V_i/V_0 = f(h_i)$ для т/х «Борис Бувин»
(□ — сопротивление льда по формуле модели;
● — сопротивление льда по формулам
The Finnish-Swedish Ice Class Rules) и танкера «Kemira»
(сплошная линия — сопротивление льда по формулам
The Finnish-Swedish Ice Class Rules)

На рис. 4 приведены такие графики скоростей движения судов типа т/х «Иван Скуридин» при движении во льдах разной толщины, рассчитанные с применением полученных результатов.

В интернете имеются данные о льдопроходимости отечественных атомных ледоколов. Применение настоящей математической модели показывает, что ледокол «Ленин» для заявленной льдопроходимости 2 м не обладал соответствующей пропульсивной мощностью, как и атомный лихтеровоз «Севморпуть» с льдопроходимостью 1,5 м. Пропульсивная мощность серии атомных ледоколов типа «Арктика», а также атомных ледоколов «Ямал», «Советский Союз» и «50 лет Победы» вполне соответствуют льдопроходимости 2 м на скорости не менее 2 уз.

На рис. 5 приведены результаты расчёта падения скорости V_i/V_0 во льду толщиной h_i для танкера водоизмещением 22 000 т, класса *IC Super* с использованием рассматриваемой модели и расчёта сопротивления льда, применяемого в *The Finnish-Swedish Ice Class Rules* и приведённого в [3]. Падение скорости представлено в виде отношения скорости движения во льду к скорости свободного хода V_i/V_0 . Как видно, расхождения результатов незначительны и наблюдаются с ростом толщины льда.

Рис. 6 также содержит кривые, рассчитанные двумя способами: для судна «Борис Бувин» с использованием предлагаемой модели и формул для определения сопротивления льда, приведённых в *The Finnish-Swedish Ice Class Rules*. Для сравнения на рисунке нанесена кривая, рассчитанная по формулам для сопротивления льда, используемым в *The Finnish-Swedish Ice Class Rules*, для танкера «Kemira» мощностью 4200 кВт, водоизмещением 8500 т, т. е. близкого по своей мощности и водоизмещению судну «Борис Бувин» [3].

Из рис. 6 видно, что для одного и того же судна т/х «Борис Бувин» оба способа дают близкие результаты, так же, как и для разных судов, близких по своим параметрам, таким как пропульсивная мощность и водоизмещение, результаты расчёта близки, что свидетельствует о достоверности модели прямо-

линейного движения судна во льду. Эта модель, в свою очередь, позволяет определить такие важные в эксплуатации характеристики, как пути торможения судов во льду разной толщины, скорости движения на вынужденных пониженных ходах при движении в караване и ряд других.

В заключение можно сказать, что наличие математической модели движения судна во льду может способствовать уточнению параметров модели для различных судов и различных типов льда путём обобщения доступных практических наблюдений с судов ледового плавания в реальных условиях. И особенно такое уточнение относится к типу льда, в котором движется судно. Действующие правила для судов ледового класса (например, *The Finnish-Swedish Ice Class Rules*) в своей основе имеют нормирование мощности силовой установки судов и сопротивление смёрзшегося битого льда в каналах. Хотя из практики ледового плавания [4] – [10] известно, что битый не смёрзшийся лед в виде шуги, накапливающейся в канале, может представлять большее препятствие, чем ровный лед, в котором проложен канал. Математическая модель движения судна во льду представляет широкие возможности для исследования движения судна и в таком льду. Объём и форма информации для капитанов судов, плавающих в ледовых условиях, требует дальнейшей разработки, в помощь которой может быть предложено представленное в данной работе математическое моделирование движения судна во льду.

Список литературы

1. Страшко А. Н. Маневрирование судна в условиях ветра. Теория и эксперимент / А. Н. Страшко, В. П. Махин // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 3 (49). — С. 23 – 26.
2. Махин В. П. Влияние волнения на движение судна в условиях ветра / В. П. Махин, А. Н. Страшко // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 2 (60) — С. 29–31.
3. Juva Mikko. On the power requirement in the Finnish-Swedish Ice Class Rules / Mikko Juva, Kai Riska // Research Report No 53. – Helsinki University of Technology, Ship Laboratory, Espoo, 2002.
4. Арикайнен А. И. Азбука ледового плавания / А. И. Арикайнен, К. Н. Чубаков. — М.: Транспорт, 1987. — 224 с.
5. Безопасность плавания во льдах / под ред. А. П. Смирнова. — М.: Транспорт, 1993. — 330 с.
6. Каштелян В. И. Сопротивление льда движению судна / В. И. Каштелян, И. И. Позняк, А. Я. Рывлин. — Л.: Судостроение, 1968. — 268 с.
7. Ионов Б. П. Ледовая ходкость судов / Б. П. Ионов, Е. М. Грамузов. — СПб: Судостроение, 2001. — 512 с.
8. Рывлин А. Я. Испытания судов во льдах / А. Я. Рывлин, Д. Е. Хейсин. — Л.: Судостроение, 1980. — 208 с.
9. Снопков В. И. Управление судном: учебник для вузов / В. И. Снопков. — СПб.: Профессионал, 2004. — 536 с.
10. Сазонов К. Е. Метод расчета ледового сопротивления судна при его движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей / К. Е. Сазонов, А. А. Добродеев // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2011. — Вып. 63 (347). — С. 73–80.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМ НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА, ВЫРАБАТЫВАЮЩИХ СКОРОСТНУЮ ИНФОРМАЦИЮ**CHARACTERIZATION OF ERRORS IN NAVIGATING COMPLEX SYSTEMS THAT PRODUCE HIGH-SPEED INFORMATION**

В статье рассмотрены навигационные системы, измеряющие параметры скоростной информации, и причины возникновения в них погрешностей. Выработка навигационных данных с повышенной точностью в большей степени зависит от скоростной информации, которая вырабатывается и передается внешним потребителям при помощи системы инерциальной навигации и гиросtabilизации «Дельта», индукционного лага ЛИИ-1, аппаратуры потребителей спутниковых систем ГЛОНАСС и НАВСТАР «Бриз-ПЛ». Погрешности счисления пути и выработки координат места корабля также зависят от точности используемой для этих целей скоростной информации, вариантов счисления и способа учета элементов течения. К тому же, при выходе из строя инфраструктуры систем источников внешней информации, необходимо автономное счисление, основанное на выработке скоростных данных собственными средствами и определении курса с максимально возможной точностью. Коррекция движения корабля при этом по визуальным ориентирам также требует выработки курса с максимально возможной точностью.

The article describes the navigation system produces high-speed data and their uncertainties. Development of navigation data with increased accuracy is largely dependent on the MSE-speed-information that is generated and transmitted to external customers using inertial navigation system and gyrostabilization «Delta», the induction lag LI2-1, machine-ry consumers GLONASS and NAVSTAR «Breeze-PL». « Error generation and dead reckoning position coordinates of the ship also depend on their accuracy used for this purpose high-speed data, numbering options and ways to address the elements of flow-cops. In addition, in case of failure of infrastructure systems external sources of information necessary to the non-autonomous dead reckoning based on the development of high-speed data-sredst you own and determining the course as accurately as possible. Correction of motion of the ship at the same time visual reference also requires the development of the course as accurately as possible

Ключевые слова: комплекс навигации и гиросtabilизации; инструментальная погрешность, мгновенная скорость движения, навигационные параметры, спутник, индукционный лаг.

Key word: complex navigation and gyrostabilization; instrumental error, instantaneous speed, navigation options, satellite, induction lag.

А

ВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ комплекс навигации и гиросtabilизации вырабатывает скоростные данные, используемые для определения параметров стабилизации технических средств: трех составляющих мгновенной скорости движения $\tilde{V}_N$, $\tilde{V}_E$, $\tilde{V}_Z$ и двух составляющих линейной скорости движения корабля относительно грунта в географической системе координат V_N , V_E . Внешним потребителям передаются скоростные данные, вырабатываемые инерциальной навигационной системой (ИНС) «Дельта», аппаратурой потребителей космической навигационной системы «Бриз-ПЛ» и относительным лагом ЛИИ-1. Две составляющие линейной скорости от ИНС «Дельта» транслируются потребителям в случае ее работы в корректируемом режиме (режим комплекса — инерциальный). В других режимах внешним потребителям поступает скоростная информация от аппаратуры потребителей космической навигационной системы (АП КНС) или от лага. Три составляющие мгновенной скорости движения $\tilde{V}_N$, $\tilde{V}_E$, $\tilde{V}_Z$ вырабатываются только ИНС [1] – [4].

Точность работы ИНС зависит от инструментальных погрешностей ее основных элементов — двухстепенных поплавковых гироскопов (ДПГ) и прецизионных поплавковых угловых компенсационных акселерометров, а также от методических погрешностей выработки навигационных параметров.

Основные источники погрешностей выработки ИНС навигационных параметров:

- дрейф ДПГ;
- нелинейность и нестабильность характеристики датчика моментов ДПГ;
- возмущающие моменты относительно оси *ОУ* подвеса маятника-поплавка чувствительного элемента акселерометра;
- нечувствительность акселерометра;
- смещение нуля характеристики акселерометра.

Дрейф ДПГ имеет в общем случае систематический характер. Нелинейность и нестабильность характеристики датчика моментов ДПГ обусловлены неточной работой цепи управления датчиком и погрешностью в величине радиуса Земли и также имеют систематический характер [5].

Инструментальные погрешности акселерометров обусловлены действием возмущающих моментов относительно оси *ОУ* подвеса маятника-поплавка. Основными причинами возникновения этих моментов является остаточное трение в опорах, упругость токопроводов к датчику угла, взаимодействие ферромагнитных масс поплавка с различными магнитными полями, конвекционные потоки поддерживающей жидкости при неравномерном распределении теплового поля и др. Суммарное влияние указанных возмущений на показания акселерометра проявляется в виде его нечувствительности, которая при производстве уменьшается до незначительных величин и смещения нуля характеристики, которая является основной погрешностью акселерометра и имеет систематический характер. При постоянной величине смещения нуля в показания акселерометра входит соответствующая проекция силы тяжести, платформа гироскопа устанавливается под углом к истинному горизонту, что влияет на значения приборных угловых скоростей и вызывает погрешность выработки инерциальной широты [6].

К основным методическим погрешностям относятся систематические погрешности выработки ИНС курса, которые определяются погрешностью выставки гироазимутгоризонта ИНС в диаметральной плоскости корабля и погрешностью трансляции курсового угла азимутальной платформы из гироазимутгоризонта в центральную вычислительную машину. Методические погрешности по величине соизмеримы с инструментальными. Их определение и компенсация осуществляются автоматически во время предварительной и окончательной подготовки корабля к бою и походу [7]. Таким образом, счисление навигационных параметров в ИНС сопровождается нарастанием во времени погрешностей счисления, что увеличивает погрешности вырабатываемых навигационных параметров.

Принцип выработки относительной скорости индукционным лагом заключается в измерении напряжения, возникающего от ЭДС, наводимой во встречном потоке воды и преобразовании ее в показания скорости. В зависимости от причин появления погрешности индукционного лага подразделяются на *инструментальные* и *методические*. По характеру проявления они могут быть *систематическими* и *случайными*.

Инструментальные погрешности в основном имеют случайный характер и обусловлены несовершенством конструкции и изготовления приборов лага, а также изменением параметров элементов в процессе эксплуатации. Поддержание уровня инструментальных погрешностей в допустимых пределах осуществляется в процессе технического обслуживания лага. Инструментальная погрешность измерения скорости лага ЛИ-2 с $P = 0,997$ не превышает 0,1 уз. Методические погрешности обусловлены различными факторами как гидродинамического, так и электромагнитного характера. Они оказывают основное влияние на точность работы лага. К основным методическим погрешностям относятся:

- погрешность, обусловленная действием пограничного слоя воды;
- погрешность, вызванная квадратурной помехой;
- погрешность, обусловленная изменением электропроводности морской воды;
- погрешности, обусловленные волнением моря, рысканием, креном и дифферентом корабля;
- погрешность, обусловленная электромагнитными полями корабля и океана.

Погрешность, обусловленная действием пограничного слоя, является наиболее существенной из методических погрешностей и может достигать значений до 1 уз. На ее величину оказывают влияние характеристики набегающего потока воды, которые в основном зависят от обрастания корпуса и скорости корабля [8].

Квадратурная помеха обусловлена созданием переменного магнитного поля в целях исключения эффекта поляризации электродов лага, что приводит к появлению в сигнале лага составляющей $U_{\text{кв}} \sin \omega t$, не зависящей от скорости.

Погрешность, обусловленная изменением электропроводности морской воды, имеет систематический характер и определяется выражением

$$\delta V = - \frac{2V \Delta R_i}{R_i + R},$$

где ΔR_i — изменение сопротивления индукционного первичного преобразователя сигнала (ИППС), вызванное изменением солёности воды; R — входное сопротивление измерительной схемы лага.

Величина внутреннего сопротивления приемного устройства зависит от удельного сопротивления морской воды. Для районов океана с солёностью воды 2 – 35 ‰ величина ΔR_i мала и погрешность лага остается практически постоянной. В районах с солёностью менее 2 ‰ $\Delta R_{\text{пв}}$ резко возрастает, что приводит к появлению погрешности скорости до нескольких десятков долей узла [9]. Влияние этих погрешностей может быть устранено заглублением чувствительности лага.

Среднеорбитальной судовой навигационной системе (СНС) свойственны погрешности, которые по происхождению подразделяются на *методические* и *аппаратурные* (инструментальные), а по характеру проявления — на *систематические* и *случайные*.

На радиосигналы, передаваемые с навигационных спутников (НС) на АП КНС, оказывают воздействие как внешние факторы (ионосфера, тропосфера), так и внутренние аппаратурные факторы, проявляющиеся при приеме, передаче, обработке радиосигналов, решении навигационной задачи и выдаче полученных результатов потребителям [10].

К методическим относятся погрешности, обусловленные влиянием ионосферы и тропосферы на прохождение радиосигнала, неточностью передаваемой с НС эфемеридной информации, геометрическими факторами созвездий НС, несовершенством метода сличения бортовой шкалы времени спутника со шкалой времени корабельного аппаратурного генератора, многолучевостью, неточным знанием высоты антенны и др.

Ионосферная погрешность обусловлена эффектом рефракции сигналов НС, вызванной неоднородностями и изменением диэлектрической проницаемости ионосферы с изменением высоты, и влечет изменение трассы, а следовательно, задержку сигнала НС. На величину ионосферной погрешности значительное влияние оказывают время года и суток, солнечная активность, геомагнитная широта места потребителя и другие факторы, определяющие условия распространения радиосигнала в ионосфере. Ионосфера является диспергирующей средой, ее рефракция зависит от частоты сигнала.

Основная составляющая тропосферной погрешности обусловлена наличием тропосферной рефракции, которая по причинам, аналогичным приведенным для ионосферы, вызывает задержку распространения радиосигнала НС в тропосфере. Значение тропосферной погрешности зависит от факторов, которые достаточно точно известны и прогнозируются (взаимные координаты НС и корабля, температура, давление, влажность воздуха). Тропосфера не является диспергирующей средой (тропосферная рефракция не зависит от частоты сигнала).

Эфемеридные погрешности связаны с неточностью определения параметров орбит навигационных спутников, а также непредсказуемым смещением положения спутников на орбите из-за различных случайных факторов. Достоверность передаваемых со спутника частотно-временных поправок и эфемерид зависит от срока, прошедшего с момента их закладки в память бортовой ЭВМ. Существующая в аппаратуре спутника задержка между выходным навигационным сигналом и выходным сигналом бортового эталона времени и частоты (групповая задержка) вносит

дополнительную погрешность в дальномерные измерения, в которую входят систематическая и случайная составляющие [11].

Вследствие несовершенства процедур сверки и хранения бортовой шкалы времени НС возникают погрешности их частотно-временного обеспечения, одним из проявлений которых является смещение фаз излучаемых дальномерных кодов и меток времени, что приводит к погрешностям измерения расстояний до спутника и расчета его координат.

Погрешности из-за многолучевости обусловлены тем, что на приемную антенну АП КНС может поступать не только прямой сигнал от НС, но и множество переотраженных сигналов от морской поверхности. Уровень отраженного сигнала может быть соизмерим с прямым сигналом, что приводит к существенным погрешностям полезного сигнала и к погрешностям в схемах слежения за его параметрами (задержкой, частотой и фазой). Величины погрешностей зависят от взаимного расположения НС, антенны и отражающей поверхности. Взаимное расположение НС и антенны АП КНС определяет величину геометрического фактора. Погрешности измерений квазидальностей по сигналам НС, расположенных на горизонте, больше, чем по сигналам НС, находящихся в районе зенита, поскольку сигнал от них до корабля проходит большее расстояние сквозь толщу ионосферы.

К основным инструментальным погрешностям относятся *шумовая* и *динамическая* погрешности схем слежения аппаратуры за задержкой прихода сигналов спутника и измерения доплеровского сдвига частоты, погрешность за изменение характеристик электроэлементов аппаратуры с течением времени, погрешности вычислительных элементов [12] – [14].

Для компенсации и стабилизации ошибок инерциального счисления в ИНС «Дельта» применяются средства внешней коррекции непрерывного действия — относительный лаг ЛИ2.1 и эпизодического действия — АП КНС «Бриз-ПЛ», ПИ РНС «Квиток-3Н». Средства коррекции эпизодического действия применяются для точной выставки начальных условий и коррекции навигационных параметров ИНС.

Скорость, вырабатываемая лагом, используется для демпфирования ИНС. По скорости от относительного лага и курсу вычисляются северная и восточная составляющие. Формируются разности с соответствующими составляющими скорости, выработанной ИНС (приборной), которые подаются на фильтр, настроенный на определенную полосу пропускания частот. На выходе фильтра получают сглаженные разности, алгебраическим сложением которых с составляющими скорости лага восстанавливают приборную скорость ИНС, используемую при дальнейшем формировании сигнала интегральной коррекции гироскопа. При этом необходимо учитывать скорость течения (суммарного сноса), так как приборная скорость ИНС вырабатывается относительно дна. Неучет течения является вторым по величине после дрейфов гироскопов возмущающим фактором для ИНС. Таким образом, основными факторами, вызывающими погрешности скоростной информации ИНС, являются использование сигнала лага напрямую, без учета течения и какой-либо предварительной обработки, высокочастотная погрешность вырабатываемой ИНС скорости и фазовые искажения, вносимые фильтром нижних частот. Способами уменьшения погрешностей вырабатываемой ИНС скорости являются повышение точности используемой для этой цели скоростной информации, получаемой от лага, а также уменьшение или более точный учет высокочастотных погрешностей непосредственно самой инерциальной системы и совершенствование применяемых в ней фильтров.

В архитектуре ИНС «Дельта» реализована сильно связанная схема комплексирования, которая предусматривает совместную обработку в вычислителе ИНС составляющих линейной скорости, вырабатываемых самой ИНС и составляющих скорости, полученной на основании данных от относительного лага (автономный режим). В случае нормальной работы АП КНС в обработку принимаются и вырабатываемые ею параметры для позиционной коррекции (корректируемый режим).

Таким образом, в результате совместной обработки скоростной информации, осуществляемой посредством динамического фильтра большой размерности, предельные погрешности (с $P = 0,997$) составляющих линейной скорости навигационного комплекса не превышают 0,5 м/с.

Список литературы

1. Михальский В. А. Метрология в кораблевождении и решение задач навигации / В. А. Михальский, В. А. Катенин. — СПб.: Элмор, 2009. — 288 с.
2. Груздев Н. М. Теория навигационных погрешностей / Н. М. Груздев. — СПб.: СПбВМИ, 2002. — 325 с.
3. Лаврентьев А. В. Технические средства кораблевождения / А. В. Лаврентьев, С. Ф. Лабути, А. Б. Парамонов, А. И. Тузов: учебник. — М.: Морские средства навигации надводных кораблей, 2007. — С. 101–114.
4. Михальский В. А. Теория и модели погрешностей навигационных измерений / В. А. Михальский, А. Г. Кушнар, М. В. Тюлькин [и др.] — СПб.: ВСОК ВМФ, 2006.
5. Пешехонов В. Г. Единая система инерциальной навигации и стабилизации «Ладога-М» / В. Г. Пешехонов, Б. Л. Шарыгин, Ю. В. Миронов // Морская радиоэлектроника. — 2003. — № 1. — С. 26–30.
6. Бабиченко А. В. Инженерная физика / А. В. Бабиченко, В. К. Шкред // Научно-технический журнал. — 2011. — № 11. — С. 33–52.
7. Иванов Б. Е. К вопросу о навигационной безопасности плавания / Б. Е. Иванов / Пятая Российская науч.-практ. конференция «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» (НО-2004). — СПб.: ГНИНГИ МО РФ, 2004. — С. 74–86.
8. Соколов А. И. Навигация и управление движением / А. И. Соколов, А. С. Фирса / Материалы XV конференции молодых ученых «Обработка сигнала в электромагнитном лаге». — СПб., 2013. — С. 88–94.
9. Смирнов Е. Л. Технические средства судовождения. — Т. 2. / Е. Л. Смирнов, А. В. Яловенко, В. К. Перфильев. — СПб.: Элмор, 2000.
10. Борисов Д. В. Возможности приёмников ГЛОНАСС и NAVSTAR, установленных на кораблях и судах ВМФ / Д. В. Борисов // Научно-методический сборник. — СПб.: СПбВМИ, 2006. — С. 54–60.
11. Алексеев С. П. Об интеграции информационного обеспечения задач навигации, стабилизации и управления движением морских подвижных объектов / С. П. Алексеев, Г. И. Емельянец // Навигация и гидрография. — 1996. — № 2. — С. 73–76.
12. Горкавенко Ю. Н. Радиотехнические и астронавигационные средства кораблевождения. — Ч. 1 / Ю. Н. Горкавенко, А. В. Лаврентьев, Н. Б. Лукашевич и др. — СПб.: СПбВМИ, 2001. — С. 84–99.
13. Горкавенко Ю. Н. Основы устройства и использования навигационной аппаратуры потребителя «Бриз» среднеорбитальных спутниковых систем ГЛОНАСС и NAVSTAR / Ю. Н. Горкавенко, А. А. Опалев, М. Ю. Шелякин. — СПб.: СПбВМИ, 2001. — С. 63–72.
14. Соловьев Ю. А. Спутниковая навигация и ее приложения / Ю. А. Соловьев. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 326 с.

УДК 532.516.5:532.582.32

А. В. Коптев
канд. физ.-мат. наук, доц.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДВОДНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ДИНАМИКУ КОРАБЛЯ

RESEARCH OF INFLUENCE OF UNDERWATER CURRENT ON THE DYNAMICS OF THE SHIP

Предложен аналитический метод расчета воздействия подводного течения на погруженную часть корабля. Метод основан на решении краевой задачи для уравнений установившегося движения вязкой несжимаемой жидкости при граничных условиях прилипания и условии для скорости водного потока в задан-

ной внешней точке. В качестве определяющих уравнений использовался интеграл уравнений Навье – Стокса для 2D установившегося движения. В результате решения задачи получены новые формулы, определяющие вертикальную и горизонтальную составляющие результирующей силы как функции исходных параметров, задающих геометрические размеры обтекаемого тела, а также интенсивность и направление подводного течения. Произведены вычисления с помощью пакета стандартных программ Maple и найдены оценки для значений гидродинамических сил.

On the paper under consideration we offer the analytical computational method for estimation of influence of underwater current upon the submerged part of the ship. Method is based on the decision of boundary value problem for equations of viscous incompressible steady state fluid flow with adhesion condition together with the condition for water-course velocity in the set external point. We take the integral of 2D steady state Navier – Stokes equations as the base equalizations. As a result of problem decision the new formulas for vertical and horizontal constituents of resulting force were obtained. The latter determines lift force and front resistance as functions of geometric dimensions of streamlined body together with the intensity and direction of underwater currents. Calculations are produced by means of routine package of Maple programs and values of hydrodynamic forces were found out.

Ключевые слова: судно, обтекание, вязкая несжимаемая жидкость, уравнение, интеграл, подъемная сила, лобовое сопротивление.

Key words: ship, overflow, viscous incompressible fluid, equation, integral, lift force, frontal resistance.

В ПРАКТИКЕ мореплавания нередко встречаются ситуации, когда приходится осуществлять навигацию в районах действия интенсивных подводных течений. Подводные течения воздействуют на погруженную часть судна и влияют на баланс действующих сил [1]. Так, основными силами, действующими на судно в вертикальном направлении, являются сила тяжести, направленная вниз, и выталкивающая архимедова сила, направленная вверх. При движении судна эти силы в среднем уравнивают друг друга. Однако в зоне действия подводного течения, когда происходит обтекание скоростным водным потоком погруженной части судна, баланс сил изменяется, возникают дополнительные силы, имеющие гидродинамическую природу, такие как подъемная сила (*Lift Force*), направленная вертикально вверх, и так называемая сила лобового сопротивления (*Frontal Resistance*), направленная горизонтально. В общем балансе сил их влияние может быть довольно значительным. С одной стороны, судно получает дополнительную положительную плавучесть и возникает тенденция всплытия, а с другой — возникает дополнительный крен и дифферент. Указанные факторы особенно важны для высокосидящих судов, таких как круизные лайнеры и морские паромы. В истории мореплавания известны случаи, когда влияние подводного течения оказывалось решающим. Судно получало крен больше критического, теряло остойчивость, что в результате приводило к катастрофе. Даже в недалеком прошлом такие катастрофы имели место. Достаточно вспомнить гибель паромов «Эстония» на Балтике (1994 г.), «Коста Конкордия» в Тирренском море (2012 г.), «Севоль» в Желтом море (2014 г.).

Чтобы учесть, в полной мере, влияние подводного течения на динамику корабля, необходимо на основе уравнений гидромеханики исследовать обтекание погруженной части корабля водным потоком и рассчитать возникающие при этом гидродинамические силы. Для решения этой задачи предлагается пренебречь некоторыми конструктивными особенностями днища корабля и в качестве простейшей модели погруженной части рассмотреть часть кругового цилиндра радиуса R и углом раствора 2α . Предлагается рассматривать вариант плоской задачи, когда подводное течение действует в поперечном направлении и картина течения одинакова во всех плоскостях, перпендикулярных главной оси судна. В сечении погруженной части цилиндра перпендикулярной плоскостью имеем сегмент круга радиуса R с углом раствора 2α , где α — некоторое заданное значение угла из диапазона $0 \leq \alpha \leq \pi$. Контуром обтекаемой поверхности является нижняя круговая часть этого сегмента, а верхняя его часть соответствует уровню свободной поверхности. Считаем, что происходит безотрывное ламинарное обтекание погруженной части судна внешним потоком жидкости, которую предполагаем вязкой и несжимаемой [2] – [4]. В качестве жидкости

рассматриваем морскую воду с заданными и неизменными физическими свойствами. Считаем, что ρ — плотность, а ν — коэффициент кинематической вязкости.

Задачу рассматриваем в декартовых координатах, оси которых направим через центр окружности, получающейся в результате сечения цилиндра поперечной плоскостью. Начало координат, таким образом, отстоит от свободной поверхности на величину $R \cos \alpha$. Ясно, что в выбранной системе координат эта величина, в общем случае, может быть и положительной, и отрицательной, и нулевой. Первая возможность реализуется при $\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \pi$, вторая — при $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$ и третья — при $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

Условия для набегающего водного потока зададим в произвольно выбранной точке M_0 , расположенной вне цилиндра, на заданной глубине. Пусть абсцисса точки M_0 равна L , а ордината — H , где L и H представляют некоторые положительные параметры. Так что точка M_0 находится на расстоянии L с левой стороны от вертикальной оси на глубине $H - R \cos \alpha$, считая от свободной поверхности. В точке M_0 полагаем заданными и продольную, и поперечную скорость движения водного потока.

Задачу рассматриваем в безразмерных переменных, выбрав удобные для данного случая масштабы. Пусть U_0 — модуль скорости жидкости в точке M_0 . Эту величину выбираем в качестве масштаба скорости. Заданную величину L полагаем масштабом длины, $\frac{U_0^2}{L}$ — масштабом ускорения, а произведение ρU_0^2 — масштабом давления.

В безразмерных переменных координаты точки M_0 определяются равенствами $x_{M_0} = -1$, $y_{M_0} = -h$, где $h = \frac{H}{L}$. Контур обтекаемого тела представляется частью окружности с уравнением $x^2 + y^2 = r^2$, где $r = \frac{R}{L}$ — безразмерный радиус цилиндра, $0 < r < 1$. Свободная поверхность соответствует плоскости, определяемой уравнением $y = y_0$, где $y_0 = -r \cos \alpha$. Интересующая нас область течения расположена ниже этой плоскости, так что вертикальная координата должна удовлетворять неравенству

$$y \leq y_0. \quad (1)$$

Задачу предлагается рассматривать на основе 2D уравнений Навье – Стокса для установившегося движения вязкой несжимаемой жидкости [2] – [4]. Записанные в безразмерных переменных, они имеют вид:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial(p + \Phi)}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial(p + \Phi)}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

Здесь u и v — соответственно продольная и поперечная скорости движения водного потока; p — давление; Re — число Рейнольдса, определяемое формулой $\text{Re} = \frac{U_0 L}{\nu}$; Φ — потенциал внешних сил. Для рассматриваемого случая $\Phi = g(y - y_0)$, где g — безразмерное ускорение свободного падения, y — вертикальная координата.

Уравнения (2) – (4) следует дополнить граничными условиями, которые предлагается задать следующим образом. Первое граничное условие состоит в том, что вдоль контура обтекаемого тела продольная и поперечная компоненты скорости обращаются в нуль. В этом состоит так называемое условие прилипания при обтекании тела вязкой жидкостью [2] – [4]. В принятых ранее обозначениях оно сводится к двум равенствам:

$$u|_{x^2+y^2=r^2}=0; \quad v|_{x^2+y^2=r^2}=0. \quad (5)$$

Предполагается, что эти равенства выполнены лишь для нижней обтекаемой части сегмента, для которой справедливо неравенство $-r \leq y \leq y_0$. Второе граничное условие задает скорость набегающего водного потока вне обтекаемого тела и задается в точке $M_0(-1; -h)$. В этой точке должен быть задан вектор скорости. В соответствии с выбором масштабов модуль этого вектора (величина U_0) задает масштаб скорости. Поэтому достаточно задать лишь угол наклона данного вектора или его тангенс. Последняя величина равна отношению поперечной и продольной скорости в точке M_0 . Будем считать, что тангенс угла наклона вектора скорости равен заданной величине $k = \operatorname{tg} \theta$, где θ — значение угла наклона. Таким образом, второе граничное условие соответствует равенству

$$\frac{v(-1; -h)}{u(-1; -h)} = k, \quad (6)$$

где h и k — заданные безразмерные параметры.

Чтобы упростить задачу, предлагается исходить не из уравнений Навье – Стокса (2) – (4) непосредственно, а из первого их интеграла. Эти соотношения, предложенные в работах [5] и [6], выведены с учетом сохранения нелинейных членов и представляют уравнения более низкого порядка относительно основных неизвестных. Кроме того, они определяют общую структуру решений [10], [11] и открывают новые возможности для построения решений [7], [12]. Указанные обстоятельства делают данные соотношения более простыми и удобными в математическом плане, чем исходные уравнения (2) – (4). Для рассматриваемого случая 2D установившегося движения первый интеграл уравнений Навье – Стокса сводится к трем равенствам:

$$p + g(y - y_0) + \frac{U^2}{2} + d = 0; \quad (7)$$

$$u^2 - v^2 + \frac{2}{\operatorname{Re}} \left(-\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial^2 \Psi_{12}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_{12}}{\partial y^2}; \quad (8)$$

$$uv - \frac{1}{\operatorname{Re}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = -\frac{\partial^2 \Psi_{12}}{\partial x \partial y}. \quad (9)$$

В уравнениях (7) – (9) использованы следующие условные обозначения: Ψ_{12} — новое ассоциированное неизвестное; U и d — соответственно модуль скорости точки водного потока и диссипация вследствие трения, вычисляемые по формулам:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2}; \quad d = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Psi_{12}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_{12}}{\partial y^2} \right). \quad (10)$$

Произвольные функции одной переменной, возникающие в общем случае при интегрировании в уравнениях (7) и (8), полагаем равными нулю. К уравнениям (7) – (9) следует добавить уравнение неразрывности (4) и граничные условия (5) и (6). Таким образом, в математическом плане постановка задачи сводится к решению четырех дифференциальных уравнений: (4), (7) – (9), относительно неизвестных u, v, p, Ψ_{12} при граничных условиях (5) и (6). Предлагаемая постановка требует также задания пяти исходных параметров: угла полураствора α , числа Рейнольдса Re , безразмерных радиуса цилиндра r и глубины h для выбранной характерной точки M_0 , а также числа k , определяющего направление вектора скорости в точке M_0 .

Силы гидродинамического воздействия на погруженную часть корабля можно найти, если решена краевая задача для уравнений (4), (7) – (9) при условиях (5) и (6). Имеем задачу обтекания части цилиндра установившимся потоком вязкой несжимаемой жидкости. Задачи этого типа представляют известный класс задач теоретической гидромеханики и имеют практическое значение. Начиная с Дж. Стокса, задачи такого типа рассматривались разными авторами и для их решения применялись различные подходы. Однако и на сегодняшний день общепринятого варианта решения нет. Основные сложности возникают из-за нелинейности уравнений и из-за задания гранич-

ного условия для набегающего потока на бесконечности [2] – [4]. При граничных условиях, аналогичных условиям (5) и (6), задача рассматривалась в работе [8]. Было предложено использовать первый интеграл уравнений Навье – Стокса, тем самым понижая порядок нелинейных членов и задавать граничное условие для набегающего потока в конечной точке. В указанной работе имело место полное обтекание цилиндра, когда роль контура обтекаемой поверхности играла целая окружность $x^2 + y^2 = r^2$. Точка M_0 задавалась координатами $x|_{M_0} = -1$, $y|_{M_0} = 0$, т. е. она была расположена в плоскости симметрии обтекаемого тела.

В настоящей работе постановка задачи содержит два существенных отличия. Во-первых, контур обтекаемой поверхности представляет лишь часть окружности в соответствии с ограничением $-r \leq y \leq -r \cos \alpha$. Имеем не полное, а лишь частичное обтекание контура, задаваемое углом полураствора α . Во-вторых, точка M_0 расположена на произвольной глубине и в общем случае несимметрично по отношению к обтекаемой поверхности. В соответствии с условием $y|_{M_0} = -h$ вводится дополнительный параметр глубины h , что дает возможность рассматривать подводные течения. Таким образом, в постановку задачи по сравнению с [8] внесено изменение во втором граничном условии (условии (6)) и вводятся два дополнительных параметра: h и α . Однако, несмотря на эти различия, для рассматриваемого случая начальные этапы решения совпадают с соответствующими этапами работы [8], и некоторыми её результатами можно воспользоваться. В частности, можно использовать выражения для поля скорости водного потока [8, формулы (13) – (14)] и для давления [8, формула (21)]:

$$u = \frac{1}{r^4} \cdot (r^2 - x^2 - y^2) \cdot [a_{01}r^2 + a_{11}r^2x + 2a_{02}r^2y - a_{01}x^2 - 4a_{10}xy - 5a_{01}y^2 - a_{11}x^3 + x^2y \cdot 2(a_{22}r^2 + a_{02}) - 5a_{11}xy^2 + y^3 \cdot 2(a_{22}r^2 - a_{02} + 2a_{20})]; \quad (11)$$

$$v = -\frac{1}{r^4} \cdot (r^2 - x^2 - y^2) \cdot [a_{10}r^2 + 2a_{20}r^2x + a_{11}r^2y - 5a_{10}x^2 - 4a_{01}xy - a_{10}y^2 + x^3 \cdot 2(a_{22}r^2 - a_{20} + 2a_{02}) - 5a_{11}x^2y + xy^2 \cdot 2(a_{22}r^2 + a_{20}) - a_{11}y^3]; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} p = & -g(y - y_0) + \left(2b_{20} - a_{10}^2 - \frac{2a_{11}}{\text{Re}}\right) - x \left(2a_{20}a_{10} + a_{11}a_{01} + \frac{16a_{01}}{\text{Re}r^2}\right) + y \left(2a_{20}a_{01} - a_{11}a_{10} + \frac{16a_{10}}{\text{Re}r^2}\right) + \\ & + x^2 \left(-2a_{20}^2 - \frac{a_{11}^2}{2} + \frac{2}{r^2} \left(a_{01}^2 - a_{10}^2 - \frac{6a_{11}}{\text{Re}}\right)\right) - \frac{8xy}{r^2} \left(a_{01}a_{10} - \frac{a_{20}}{\text{Re}}\right) + y^2 \left(\frac{2a_{10}^2}{r^2} - \frac{2a_{01}^2}{r^2} - 2a_{20}^2 - \frac{a_{11}^2}{2} + \frac{12a_{11}}{\text{Re}r^2}\right) + \\ & + \frac{4x^3}{r^2} \left(\frac{a_{20}a_{10}}{3} + a_{11}a_{01} + \frac{2a_{01}}{\text{Re}r^2}\right) - \frac{2x^2y}{r^2} \left(8a_{20}a_{01} + a_{11}a_{10} + \frac{12a_{10}}{\text{Re}r^2}\right) + \frac{2xy^2}{r^2} \left(8a_{20}a_{10} - a_{11}a_{01} + \frac{12a_{01}}{\text{Re}r^2}\right) + \\ & + \frac{4y^3}{r^2} \left(a_{11}a_{10} - \frac{a_{20}a_{01}}{3} - \frac{2a_{10}}{\text{Re}r^2}\right) + \frac{x^4}{r^4} \left(7a_{10}^2 - 3a_{01}^2 + 2r^2a_{11}^2 + 4r^2a_{20}^2 + \frac{8a_{11}}{\text{Re}}\right) + \frac{8x^3y}{r^4} \left(\frac{7}{3}a_{10}a_{01} - r^2a_{20}a_{11} - \frac{8a_{20}}{\text{Re}}\right) + \\ & + \frac{4x^2y^2}{r^4} (a_{01}^2 + a_{10}^2) + \frac{8xy^3}{r^4} \left(\frac{7}{3}a_{10}a_{01} + r^2a_{20}a_{11} - \frac{8a_{20}}{\text{Re}}\right) + \frac{y^4}{r^4} \left(7a_{01}^2 - 3a_{10}^2 + 4r^2a_{20}^2 + 2r^2a_{11}^2 - \frac{8a_{11}}{\text{Re}}\right). \quad (13) \end{aligned}$$

Приведенные выражения являются результатом решения определяющих уравнений с учетом лишь одного граничного условия – условия прилипания. Они справедливы и в рассматриваемом случае, с той лишь разницей, что в правой части выражения для p следует полагать $y_0 = -r \cos \alpha$. Выбор аддитивной постоянной давления в (13) можно осуществить аналогично работе [8], приняв $b_{20} = \frac{1}{2}a_{10}^2 + \frac{a_{11}}{\text{Re}}$, а также используя полученные в работе [8, формулы (16) и (17)] выражения для коэффициентов разложения a_{ij} :

$$a_{10} = \frac{24}{r \text{Re}} c_0; \quad a_{01} = \pm \frac{24}{r \text{Re}} \sqrt{1 - c_0^2}; \quad a_{22} = 0;$$

$$a_{11} = \frac{24}{r^2 \text{Re}} (2c_0^2 - 1); \quad a_{02} = \pm \frac{24}{r^2 \text{Re}} c_0 \sqrt{1 - c_0^2}; \quad a_{20} = \mp \frac{24}{r^2 \text{Re}} c_0 \sqrt{1 - c_0^2}. \quad (14)$$

В выражении (14) c_0 представляет некоторую величину, удовлетворяющую неравенству

$$-1 \leq c_0 \leq 1. \quad (15)$$

Однако на этапе вычисления подъемной силы и силы лобового сопротивления имеем существенные отличия от работы [8]. Для рассматриваемого случая обтекаемый контур представляет лишь часть окружности, и выражение (13) следует интегрировать вдоль интервала углов φ , соответствующего неравенству $-r \leq y \leq -r \cos \alpha$. В качестве такого интервала использован $\left(-\frac{\pi}{2} - \alpha; -\frac{\pi}{2} + \alpha\right)$. С учетом этого обстоятельства исходные формулы для подъемной силы и силы лобового сопротивления [4], возникающих вследствие обтекания водным потоком, приобретают вид:

$$F_y = - \int_{-\frac{\pi}{2}-\alpha}^{-\frac{\pi}{2}+\alpha} p(r \cos \varphi; r \sin \varphi) \cdot r \sin \varphi d\varphi; \quad F_x = - \int_{-\frac{\pi}{2}-\alpha}^{-\frac{\pi}{2}+\alpha} p(r \cos \varphi; r \sin \varphi) \cdot r \cos \varphi d\varphi. \quad (16)$$

Интегрирование по этим формулам с учетом выражений (13) и (14) приводит к следующим результатам:

$$F_y = gr^2(\alpha - 0,5 \sin 2\alpha) - \frac{576}{r \text{Re}^2} (-11,66 \sin \alpha + 6,11 \sin^3 \alpha - 1,6 \sin^5 \alpha + c_0(1,67\alpha - 1,67 \sin 2\alpha - 1,25 \sin 4\alpha) + \\ + c_0^2(17,33 \sin \alpha - 12,22 \sin^3 \alpha + 3,2 \sin^5 \alpha) + c_0^3(1,67 \sin 4\alpha + 3,34 \sin 2\alpha) + \\ + c_0^4(-3,2 \sin^5 \alpha + 5,34 \sin^3 \alpha - 8 \sin \alpha)); \quad (17)$$

$$F_x = \frac{480\sqrt{1-c_0^2}}{r \text{Re}^2} (2\alpha + 0,2 \sin 2\alpha + 0,5 \sin 4\alpha + c_0(16,8 \sin^3 \alpha - 7,68 \sin^5 \alpha) - 2c_0^2 \sin 4\alpha + \\ + c_0^3(30,72 \sin^5 \alpha - 25,6 \sin^3 \alpha)). \quad (18)$$

Формулы (17) и (18), которые определяют выражения для гидродинамических сил при произвольных значениях угла полураствора обтекаемой части $0 \leq \alpha \leq \pi$, являются новыми. В частном случае ($\alpha = \pi$) эти формулы приводят к выражениям для F_x , F_y , совпадающим с выражениями для случая полного обтекания кругового контура [8, формула (25)].

Проанализируем правые части формул (17) и (18). Ясно, что за исключением особо редких случаев, F_y и F_x отличны от нуля, а значит, парадоксов типа Стокса или Даламбера [2] – [4] в данном случае нет. В правых частях рассматриваемых формул присутствуют величины, задаваемые в качестве исходных, а также другие величины, требующие уточнения. Из заданных изначально величин там присутствует число Рейнольдса Re , радиус обтекаемого цилиндра r и угол полураствора обтекаемой части α . Величина c_0 нуждается в уточнении. Ее значение следует определять с помощью граничного условия (6). Заметим также, что первая группа членов в правой части выражения для F_y дает безразмерное значение архимедовой силы, действующей на погруженное в жидкость тело. Архимедова сила пропорциональна объему погруженной части тела и направлена вверх. В данном случае, когда рассматривается плоская задача, эта величина будет пропорциональна площади поперечного сечения погруженной части, т. е. площади сегмента окружности радиуса r и углу раствора 2α . Площадь этой фигуры равна $r^2(\alpha - 0,5 \sin 2\alpha)$. Именно такой множитель и наблюдается в первом положительном слагаемом правой части формулы (17).

Известно, что архимедова сила и сила тяжести являются статическими и никак не связаны с движением тела. В противоположность этому сила воздействия водного потока представляет динамическую составляющую, которая целиком определяется движением водного потока. Ука-

занная динамическая составляющая вносит свой вклад в правую часть формулы (17) и целиком определяет правую часть (18). Каждое из этих слагаемых зависит от c_0 . Определим значение этой величины, исходя из условия (6). С учетом выражений (11) и (12) для u, v при $x = -1, y = -h$ составим дробь $\frac{v(-1; -h)}{u(-1; -h)}$ и приравняем ее заданной величине k . Уходя от знаменателя и используя выражения (14) и (15), получаем равенство, равносильное (6):

$$e_1 c_0^2 + e_2 c_0 + e_3 = \sqrt{1 - c_0^2} (e_4 c_0 + e_5). \quad (19)$$

Коэффициенты e_i в (19) определяются через заданные параметры согласно формулам:

$$e_1 = 2r(h+k) - 2 \frac{(k+h^3+5kh^2+5h)}{r}; \quad e_2 = 5 - r^2 + h^2 + 4kh; \quad e_3 = -r(k+h) + \frac{(h^3+5kh^2+5h+k)}{r};$$

$$e_4 = 2r(1-kh) + 2 \frac{(3h^3k+h^2-kh-3)}{r}; \quad e_5 = -5kh^2 - 4h - k(1-r^2). \quad (20)$$

Уравнение (19) представляет иррациональное уравнение относительно c_0 . Чтобы его разрешить, необходимо избавиться от радикалов путем возведения в квадрат. Однако впоследствии следует произвести отбор корней, исходя из двух положений. Первое состоит в выполнении ограничения (15), а второе — в том, что левая и правая части равенства (19) должны иметь одинаковые знаки. Для этого должно выполняться неравенство

$$\frac{e_1 c_0^2 + e_2 c_0 + e_3}{e_4 c_0 + e_5} > 0. \quad (21)$$

Таким образом, в качестве критериев отбора корней при решении уравнения (19) имеем неравенства (15) и (21). Далее возводим равенство (19) в квадрат. После перегруппировки слагаемых приходим к уравнению четвертой степени относительно c_0 , которое можно представить в виде

$$c_0^4 + \zeta_1 c_0^3 + \zeta_2 c_0^2 + \zeta_3 c_0 + \zeta_4 = 0. \quad (22)$$

Коэффициенты ζ_i последнего уравнения определены через коэффициенты e_j уравнения (19) по формулам:

$$\zeta_1 = 2 \frac{e_1 e_2 + e_4 e_5}{e_1^2 + e_4^2}; \quad \zeta_2 = \frac{2e_1 e_3 + e_2^2 + e_5^2 - e_4^2}{e_1^2 + e_4^2}; \quad \zeta_3 = 2 \frac{e_2 e_3 - e_4 e_5}{e_1^2 + e_4^2}; \quad \zeta_4 = \frac{e_3^2 - e_5^2}{e_1^2 + e_4^2}. \quad (23)$$

Уравнение (22) есть приведенное уравнение четвертой степени, которое может быть сведено к уравнениям более низких степеней, если воспользоваться методом Феррари и формулами Кордано [9]. Таким образом, данное уравнение можно разрешить аналитически, тем самым определив c_0 через исходные величины. В результате задача определения гидродинамических сил в общем виде будет решена.

Для практических целей удобно использовать численное решение уравнения (22). Этого можно достигнуть с помощью стандартных программ пакета *Maple*. В данной работе использована именно эта возможность. Приведем результаты расчетов. При некоторых значениях исходных параметров было произведено вычисление величины c_0 и всех других интересующих величин, включая F_y и F_x . Величины, определяющие масштабы, были выбраны как $L = 10$ м и $U_0 = 2$ м/с. В качестве исходных параметров были взяты $\alpha = \frac{\pi}{4}$, $k = 1$. Параметр r был принят равным 0,5, что в размерных единицах соответствует $R = 5$ м. Этому значению радиуса соответствует судно среднего водоизмещения с поперечным размером порядка 10 м. Параметр h полагался равным 1,5, так что точка M_0 , в которой задается второе граничное условие, находится на глубине, равной $1,5 \cdot 10 - 5 \cos \frac{\pi}{4} = 12,46$ м.

Безразмерные коэффициенты уравнения (22), найденные по формулам (21) и (23), равны $\zeta_1 = -0,4261$, $\zeta_2 = -0,9385$, $\zeta_3 = 0,2746$, $\zeta_4 = 0,1877$. Численное решение уравнения (22) с помощью программ *Maple* дало четыре возможных вещественных значения: $c_0^{(1)} = 0,8297$, $c_0^{(2)} = 0,7673$,

$c_0^{(3)} = -0,3665$, $c_0^{(4)} = -0,8044$, однако критериям отбора (15), (21) удовлетворяют не все из них. Если неравенству (15) удовлетворяют все четыре значения, то неравенству (21) — только $c_0^{(4)}$. Таким образом, в качестве решения уравнения (19) имеем только значение $c_0 = -0,8044$.

Подъемная сила и лобовое сопротивление, вычисленные по формулам (17), (18), в безразмерных единицах получились следующими: $F_y = 1,748 + 1,469 \cdot 10^{-11}$; $F_x = 4,383 \cdot 10^{-12}$. Расчеты показали, что F_x является сравнительно малой величиной и что для F_y основной вклад дает первое слагаемое, определяемое архимедовой силой, тогда как вклад от динамической составляющей, вызванной подводным течением, сравнительно невелик. Однако при уменьшении величины α и значения параметра h эта тенденция начинает изменяться и вклады от гидродинамических составляющих становятся все более заметными. Они также становятся более значимыми и при увеличении интенсивности подводного течения, определяемого величиной U_0 . Обращает на себя внимание также отличный от нуля момент силы F_x , который оказывает явное влияние на остойчивость судна в поперечном направлении.

Вывод. Предлагаемая модель и методика расчета позволяют на практике определять гидродинамические силы, возникающие вследствие подводного течения при обтекании подводной части корабля, и оценивать риски, связанные с их возникновением.

Список литературы

1. *Анфимов В. Н.* Устройство и гидромеханика корабля / В. Н. Анфимов. — Л.: Судостроение, 1974. — 368 с.
2. *Кочин Н. Е.* Теоретическая гидромеханика / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963. — Ч. 2. — 727 с.
3. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1987. — 833 с.
4. *Валландер С. В.* Лекции по гидроаэромеханике / С. В. Валландер. — Л.: Изд-во Ленингр. госуд. ун-та им. А. А. Жданова, 1978. — 294 с.
5. *Коптев А. В.* Первый интеграл и пути дальнейшего интегрирования уравнений Навье – Стокса / А. В. Коптев // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Серия: Естественные и точные науки. — 2012. — № 147. — С. 7–17.
6. *Коптев А. В.* Как проинтегрировать уравнения Навье – Стокса / А. В. Коптев // Физическая механика. — Вып. 8. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. — С. 218–226.
7. *Коптев А. В.* Решение начально-краевой задачи для 3D уравнений Навье – Стокса и его особенности / А. В. Коптев // Изв. Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Серия: Естественные и точные науки. — 2014. — № 165. — С. 7–18.
8. *Коптев А. В.* Динамические реакции подводного трубопровода на морские течения / А. В. Коптев // Вестник государственного ун-та морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4. — С. 107–114.
9. *Кочаргин И. Ф.* Алгебраические уравнения / И. Ф. Кочаргин. — М.: Изд-во Физматкнига, 2006. — 160 с.
10. *Koptev A. V.* Structure of solutions of 3D Navier – Stokes equations / A. V. Koptev // Дифференциальные уравнения и динамические системы: материалы Междунар. конф. / Математический ин-т им. В. А. Стеклова РАН. — 2014. — С. 212–214.
11. *Koptev A. V.* The Structure of Solution of the Navier – Stokes Equations / A. V. Koptev // Вестник национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт». — Вып. 3 (6). — 2014. — С. 656–660.
12. *Koptev A. V.* Generator of solutions for 2D Navier – Stokes equations / A. V. Koptev // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, Issue 7(3). — 2014. — P. 324–330.

АДАПТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СУДНА НА ОСНОВЕ ПРОСТЫХ МОДЕЛЕЙ

SIMPLE MODELS BASED ADAPTIVE IDENTIFICATION OF SHIP PARAMETERS

В настоящей работе рассматривается практически важная задача идентификации параметров судна, решение которой демонстрируется на примере простейших моделей 1-го порядка: линейной модели Номото и нелинейной модели Норбина. Для идентификации параметров использован метод скоростного градиента, суть которого заключается в составлении интегрального или локального целевого функционала, выражающего степень близости идентифицируемого объекта (судна) и его настраиваемой модели. Получены алгоритмы адаптивной настройки оценок параметров идентифицируемого объекта. Алгоритмы основаны на вычислении градиента производной по времени целевого функционала, вычисленного в силу уравнений системы. Численные эксперименты подтвердили работоспособность полученных алгоритмов адаптивной идентификации. Рассмотренный подход может быть распространен на решение задач параметрической идентификации с использованием линейных и нелинейных моделей более высокого порядка.

The paper is devoted to the problem of ship parameter identification. The solving of this problem is demonstrated on the basis of simple ship models of first order, namely, Nomoto's linear model and Norbin's nonlinear model. To identify the parameters, the speed gradient method is applied. The main idea of the method consists in such an adjustment of controlled object model parameters that a difference between dynamics of an object and its model tends to zero. Algorithms of adaptive adjustment for estimates of identified object parameters are derived. Numerical simulations had confirmed an effectiveness of considered algorithms of adaptive identification.

Ключевые слова: управление судном, модель Номото, модель Норбина, параметрическая идентификация, метод скоростного градиента, алгоритм адаптации.

Key words: ship control, Nomoto's model, Norbin's model, parameter identification, speed gradient method, adaptation algorithm.

Введение

Задачи управления сложными динамическими системами, в том числе морскими подвижными объектами (МПО), предполагают обеспечение требуемой реакции системы вследствие сформированных управляющих сигналов. Как правило, неустойчивость, нелинейность и неопределённая динамика реагирования объекта обуславливают сложность задач управления. Традиционно для синтеза качественной системы управления требуется знание параметров управляемого объекта, т.е. решение задачи параметрической идентификации. Спецификой МПО является их сложное взаимодействие с внешней средой, выражающееся, например, в наличии присоединённых масс и моментов инерции, влиянии ветроволновых воздействий и изменении характеристик поверхности судна, его загрузки и др. [1] – [3]. В современной теории управления разработано достаточно много методов идентификации параметров динамических объектов, среди которых к числу наиболее перспективных можно отнести методы, основанные на адаптивном подходе. В настоящей работе решается задача адаптивной идентификации для простых моделей судов [4] – [7], основанная на методе скоростного градиента [8], [9].

Основная часть

Модель надводного водоизмещающего судна в процессе решения задачи управления курсом при некоторых упрощающих допущениях [1] может быть представлена в виде следующих дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= \omega; \\ J\dot{\omega} &= k_1\delta - c_1\omega,\end{aligned}\tag{1}$$

где φ — курс; ω — угловая скорость (скорость рысканья); δ — угол отклонения руля; k_1 и c_1 — коэффициенты момента силы и вязкого сопротивления соответственно; J — общий момент инерции с учётом присоединённых масс воды.

Приведённые дифференциальные уравнения представляют собой простейшую модель, известную как модель Номото 1-го порядка [10]. Соответствующая ей передаточная функция имеет вид

$$W(s) = \frac{k_p}{s(Ts + 1)},\tag{2}$$

где $k_p = \frac{k_1}{c_1}$; $T = \frac{J}{c_1}$.

Модель Норбина [10] учитывает нелинейную зависимость момента вязкого сопротивления от скорости рысканья и в простейшем случае может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= \omega; \\ J\dot{\omega} &= k_2\delta - c_2\omega^3.\end{aligned}\tag{3}$$

Необходимо отметить, что параметры приведённых моделей могут варьироваться в достаточно широких пределах в зависимости от скорости движения, загрузки судна и других факторов.

При использовании метода скоростного градиента для синтеза системы управления движением судна необходимо знать параметры математической модели судна. При решении этой задачи в данной работе используется метод скоростного градиента, разработанный и описанный А. Л. Фрадковым, который состоит в следующем. Предполагается, что динамический объект управления определён уравнением

$$\dot{x} = F(x, p, t),\tag{4}$$

где x — вектор состояния управляемого объекта и p — вектор его параметров.

Целью управления является минимизация функции:

$$Q = Q(x, t) \rightarrow \min.$$

На первом шаге алгоритма метода скоростного градиента вычисляется скорость изменения $Q(x, p, t)$ вдоль траектории, определяемой уравнением (4):

$$\dot{Q}(x, t) = \frac{\partial Q}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial Q}{\partial x_i} F_i(x, p, t).\tag{5}$$

Следующий шаг — нахождение градиента для полученной производной по настраиваемым параметрам:

$$\frac{\partial \dot{Q}(x, t)}{\partial p} = \left(\frac{\partial \dot{Q}(x, t)}{\partial p_1} \dots \frac{\partial \dot{Q}(x, t)}{\partial p_n} \right).$$

В заключение для минимизации целевой функции $Q(x, p, t)$ выполняется настройка вектора изменяемых параметров в направлении, противоположном скоростному градиенту:

$$\frac{dp}{dt} = -\Gamma \frac{\partial \dot{Q}(x, t)}{\partial p},\tag{6}$$

где Γ — симметричная положительно определённая, например, диагональная матрица:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_n \end{bmatrix},$$

коэффициенты γ_i обуславливают скорость адаптации настраиваемых параметров.

Рассмотрим адаптивную идентификацию параметров МПО.

Модель Номото. Применим метод скоростного градиента для идентификации параметров моделей МПО. Линейную модель Номото 1-го порядка (второе уравнение) можно записать в виде

$$\dot{\omega} = a\omega + b\delta, \quad (7)$$

где $a = -\frac{1}{T}; b = \frac{k_p}{T}$.

Выберем настраиваемую (идентифицирующую) модель в виде

$$\dot{\omega}_m = A_m\omega + B_m\delta + v, \quad (8)$$

где a_m, b_m — настраиваемые параметры, а v — вспомогательный сигнал.

Введём дополнительную переменную

$$S = \omega - \omega_m \quad (9)$$

и определим целевую функцию

$$Q = \frac{1}{2} s^2. \quad (10)$$

Вычислим производную целевой функции по времени, воспользовавшись уравнениями (7) и (8):

$$\dot{Q} = s\dot{s} = s(\dot{\omega} - \dot{\omega}_m) = s(a\omega + b\delta - A_m\omega - B_m\delta - v). \quad (11)$$

Выполним дифференцирование по параметрам настраиваемой модели:

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial A_m} = -s\omega; \quad \frac{\partial \dot{Q}}{\partial B_m} = -s\delta. \quad (12)$$

В результате алгоритм настройки параметров модели может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} \dot{A}_m &= \gamma s \omega; \\ \dot{B}_m &= \gamma s \delta; \\ v &= v_0 \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (13)$$

(возможны различные варианты выбора вспомогательного сигнала).

Как показано в [8], при определённых условиях имеет место следующее идентификационное свойство настраиваемой модели:

$$a_m \rightarrow a;$$

$$b_m \rightarrow b.$$

Модель Норбина. Для нелинейной модели Норбина 1-го порядка будем считать, что момент силы вязкого сопротивления имеет характер кубической зависимости от скорости рысканья:

$$\dot{\omega} = -\frac{k_{\delta}}{J}\delta + \frac{k_p}{J}\omega^3, \quad (14)$$

приняв $a = \frac{k_p}{J}; b = -\frac{k_{\delta}}{J}$, получим:

$$\dot{\omega} = a\omega^3 + b\delta;$$

$$\dot{\omega}_m = A_m\omega^3 + B_m\delta + v. \quad (15)$$

С учётом (9), (10), (15) вычислим производную целевой функции по времени:

$$\dot{Q} = s\dot{s} = s(\dot{\omega} - \dot{\omega}_m) = s(a\omega^3 + b\delta - A_m\omega^3 - B_m\delta - v). \quad (16)$$

Дифференцирование (16) по параметрам настраиваемой модели даёт следующие результаты:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{Q}}{\partial A_m} &= -s\omega^3; \\ \frac{\partial \dot{Q}}{\partial B_m} &= -s\delta; \end{aligned} \quad (17)$$

$$v = s.$$

Таким образом, алгоритм настройки нелинейной идентифицирующей модели может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} \dot{A}_m &= \gamma s \omega^3; \\ \dot{B}_m &= \gamma s \delta; \\ v &= v_0 \text{sign}(s). \end{aligned} \quad (18)$$

Для проверки работоспособности полученных алгоритмов адаптивной идентификации на основе простых моделей Номото и Норбина было проведено моделирование в среде *MATLAB Simulink*. Система адаптивной идентификации параметров для линейной модели Номото 1-го порядка приведена на рис. 1. На вход объекта управления был подан задающий сигнал из двух гармоник, различающихся по амплитуде и частоте.

Переменная s (рис. 2) отражает отклонение сигнала на выходе настраиваемой модели ω_m от сигнала на выходе моделируемого объекта ω .

Результаты моделирования подтвердили, что настраиваемые параметры A_m и B_m (рис. 3), согласно идентификационному свойству модели, по величине стремятся к аналогичным коэффициентам, заданным для объекта управления: $A_m \approx a = -0,8$; $B_m \approx b = 0,05$.

На рис. 4 приведена система адаптивной идентификации параметров для нелинейной модели Норбина 1-го порядка.

Процессы, характеризующие адаптивную идентификацию для нелинейной модели, приведены на рис. 5 и 6.

Так же, как и для линейной системы, адаптивная идентификация для нелинейного объекта обеспечивает соответствие настраиваемых параметров A_m и B_m (рис. 6) их истинным значениям: $A_m \approx a = -0,3$; $B_m \approx b = 0,05$.

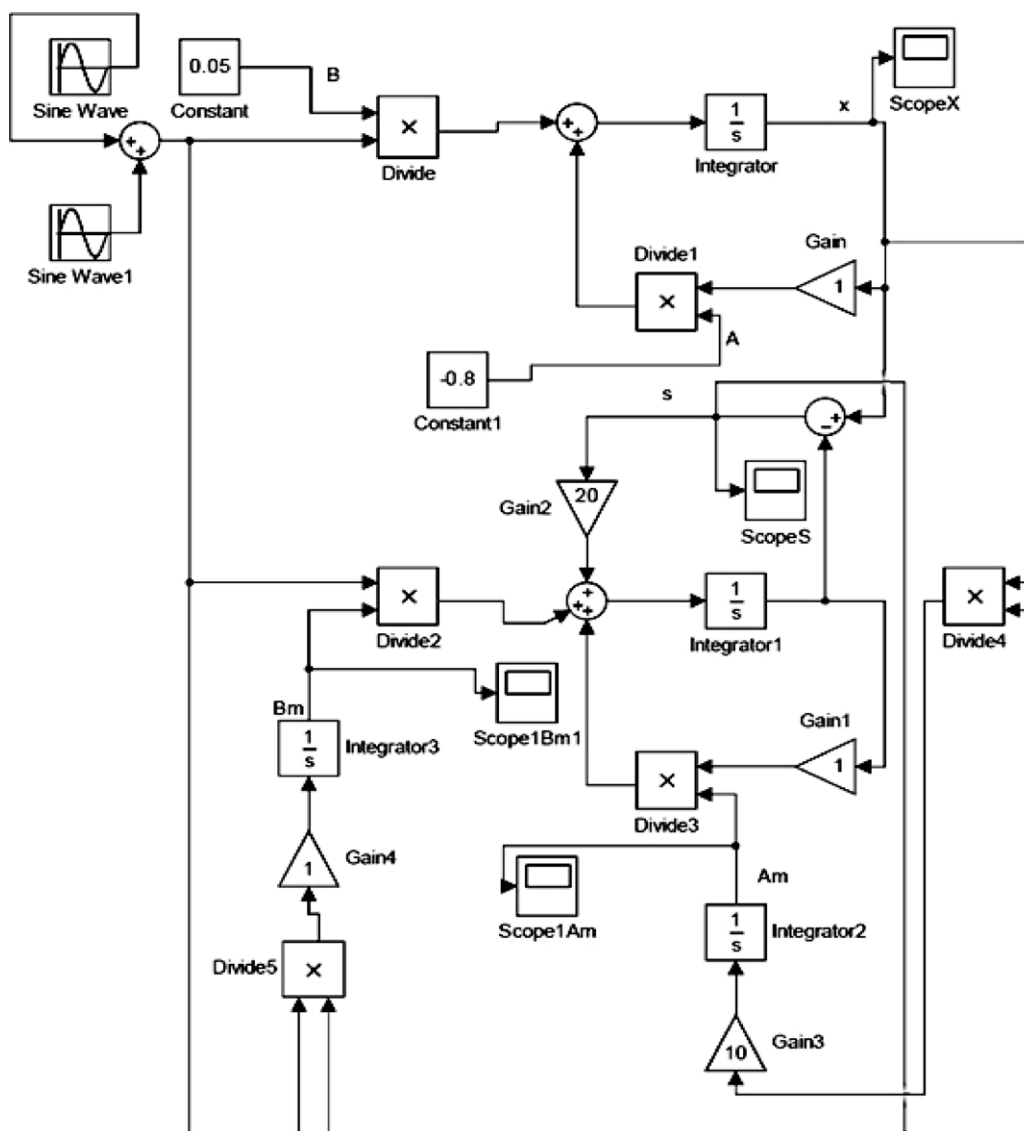


Рис. 1. Система адаптивной идентификации параметров для линейной модели Номото 1-го порядка

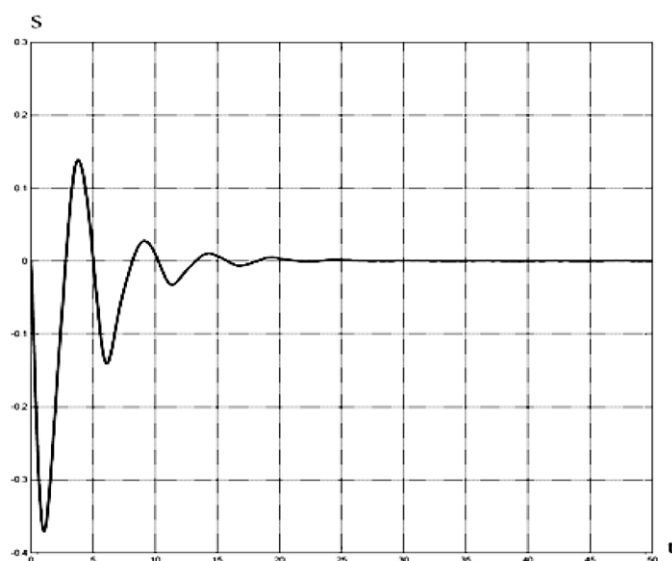


Рис. 2. Отклонение сигнала на выходе настраиваемой модели от сигнала на выходе объекта для линейной модели Номото 1-го порядка

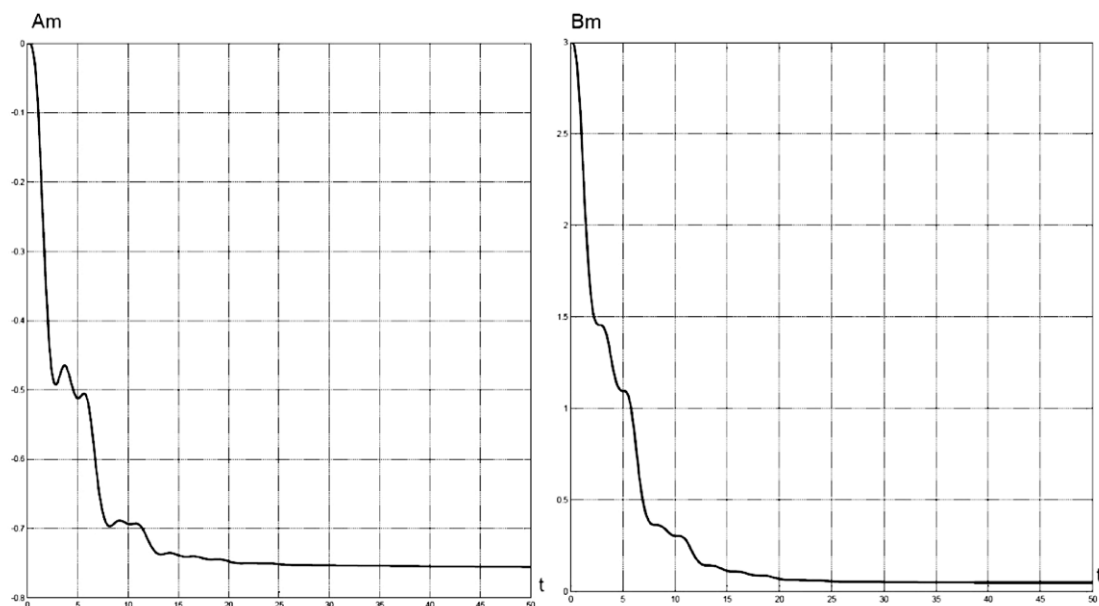


Рис. 3. A_m и B_m для линейной модели Номото 1-го порядка

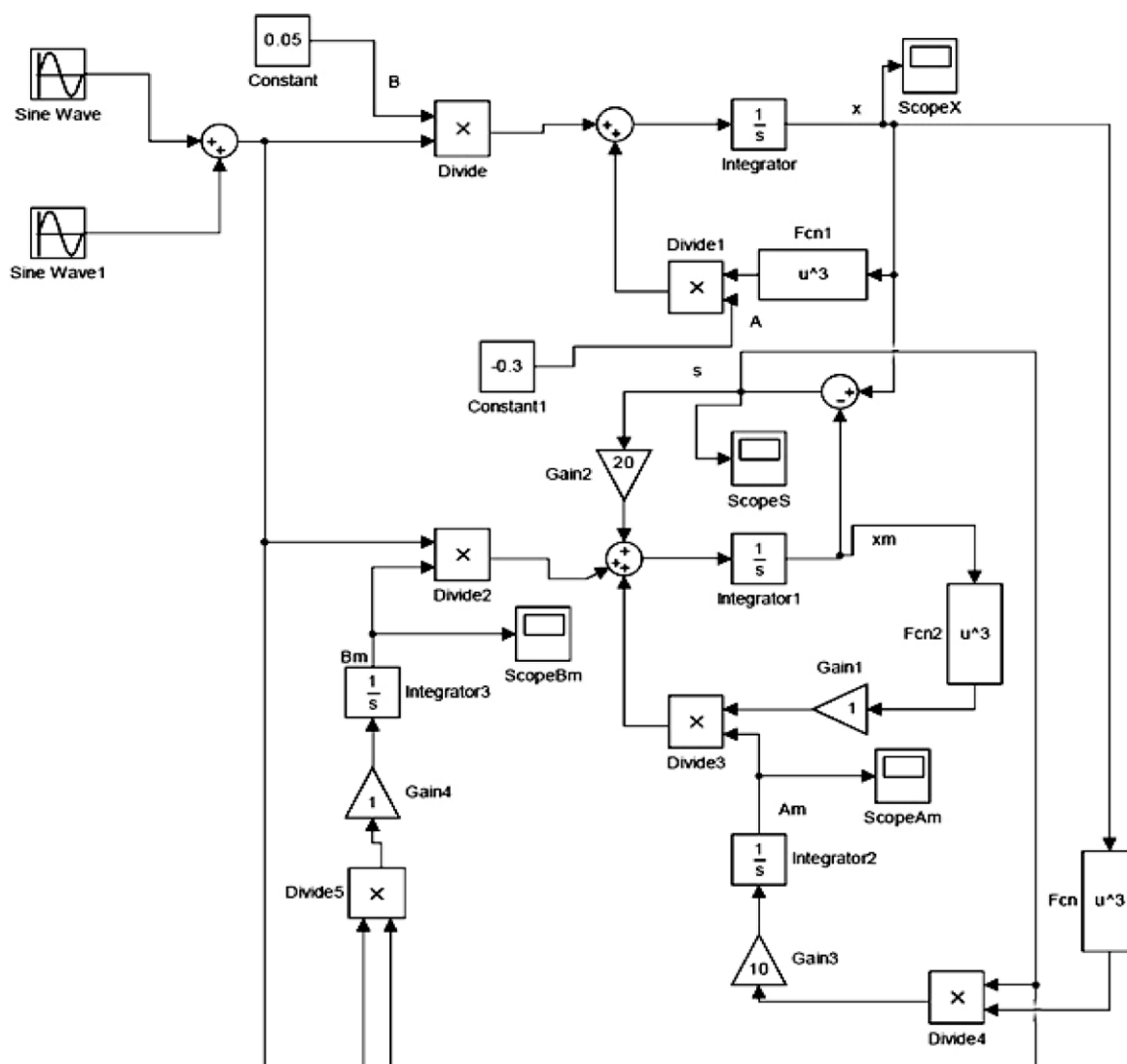


Рис. 4. Система адаптивной идентификации параметров для нелинейной модели Норбина 1-го порядка

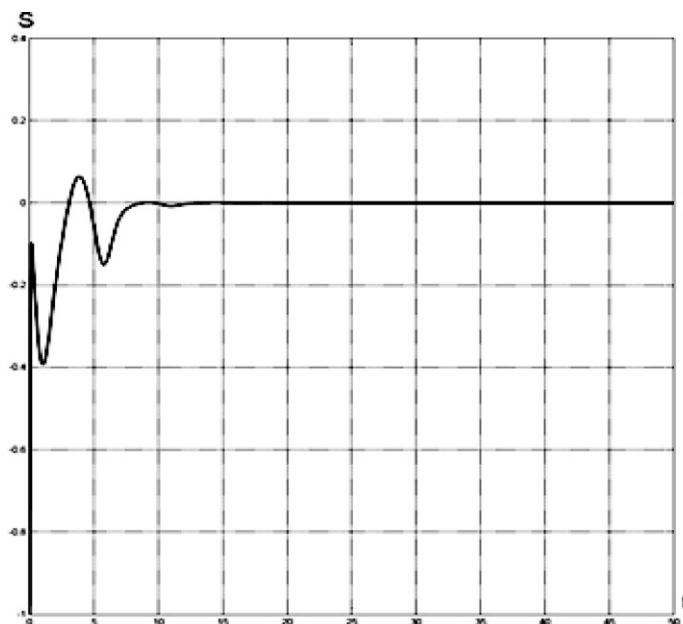


Рис. 5. Отклонение сигнала на выходе настраиваемой модели от сигнала на выходе объекта для нелинейной модели Норбина

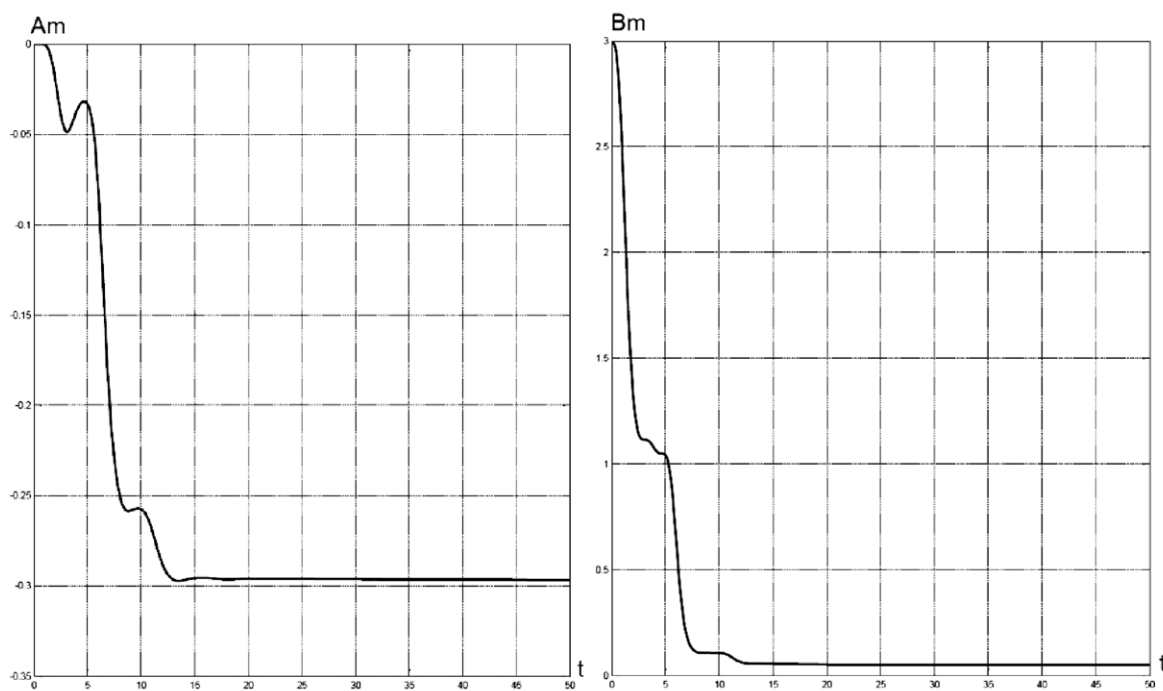


Рис. 6. A_m и B_m для нелинейной модели Норбина

Выводы

1. Метод скоростного градиента позволил построить схемы адаптивной идентификации параметров линейного и нелинейного динамических объектов.
2. Полученные результаты моделирования позволяют предположить, что использованный подход может быть распространён на более широкий класс нелинейных динамических объектов, в частности на системы с функциональной неопределённостью. Актуальность решения подобной задачи, например, для МПО объясняется априорно неопределённым нелинейным взаимодействием с внешней средой.

Список литературы

1. Лукомский Ю. А. Навигация и управление движением судов: учебник / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. — СПб.: Элмор, 2002. — 360 с.
2. Manuel Haro Casado. Recursive identification procedure of the nonlinear model ship based on the turning test manoeuvring / Manuel Haro Casado, A. Fernandez Ameal // CAMS 2004, IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems. — Ancona, Italy, 2004. — P. 197–202.
3. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. — Одесса: Латстар, 2002. — 310 с.
4. Юдин Ю. И. Использование идентифицированных математических моделей судна для обеспечения безопасности судождения / Ю. И. Юдин, А. Г. Степахно, А. Н. Гололобов // Вестник МГТУ. — 2009. — Т. 12. — № 1. — С. 10–12.
5. Романов А. В. Структурная и параметрическая идентификация математической модели водоизмещающих судов / А. В. Романов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 1. — С. 115а–118.
6. Жабко Н. А. Параметрическая идентификация динамических моделей морских судов / Н. А. Жабко // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2012. — Т. 8. — № 1. — С. 80–84.
7. Юдин Ю. И. Математические модели плоскопараллельного движения судна / Ю. И. Юдин, И. И. Сотников // Вестник МГТУ. — 2009. — Т. 12. — № 1. — С. 10–12.
8. Мирошник И. В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 549 с.
9. Фрадков А. Л. О применении кибернетических методов в физике / А. Л. Фрадков // Успехи физических наук. — 2005. — Т. 175. — № 2. — С. 113–138.
10. Amerongen J. Van Adaptive Steering of Ship: PhD thesis of Job van Amerongen // Delft University of Technology. — 2005. — 156 p.

УДК 004: 656.61.073

В.М. Дорожко,
канд. физ.-мат. наук

ОПРОКИДЫВАНИЕ КОНТУРА МОРСКОГО СУДНА «ВОЛНОЙ-УБИЙЦЕЙ»

CAPSIZING OF SEAGOING VESSEL CONTOUR DUE TO «ROGUE WAVE»

Разработана технология моделирования динамического воздействия «волны-убийцы» высотой 30 м на контур (мидель-сечение) морского судна на основе CFD-метода. Численное моделирование воздействия «волны-убийцы» на полноразмерный контур было выполнено с целью получения численных оценок работы момента сил. Детально рассматривается численное моделирование опрокидывания контура и оценка параметров его движения. В зависимости от времени и угла крена вычислены момент сил и работа момента сил, действующих на контур. Установлено, что характер эволюции работы момента сил может применяться для оценки динамической устойчивости контура на «волне-убийце». Оценена динамическая устойчивость контуров судов водоизмещением 3040–9260 т на «волнах-убийцах» длиной 120–190 м. Полученные результаты и технология моделирования могут быть использованы при проектировании морских судов.

CFD-based simulation technology for evaluation of the dynamic impact of 30 meters high of «rogue wave» on free-floating contour (middle-vessel cross section) has been developed. Numeric modeling of the impact of «rogue wave» on a full-sized contour which provides estimates of moment force work was fulfilled. The paper treats in detail the aspects associated with the numerical modeling of contour capsize and estimation of the parameters of its motion. Time and angle histories of moment of force and work moment force acting on the contour were calculated. It was found out that the pattern of the evolution of the moment force work can be used as a measure of dynamic stability of the contour in «rogue wave». Dynamic stability of the contours of the vessels with the displacement from 3040 to 9260 tons in «rogue-waves» with the length from 120 to 190 meters was estimated. The obtained results and simulation technology can be used for the design of seagoing vessels.

Ключевые слова: «волна-убийца», вычислительная гидродинамика, контур судна, кренящий момент, восстанавливающий момент, момент силы, работа момента силы, угол крена, опрокидывание судна, динамическая остойчивость.

Key words: «rogue wave», computational fluid dynamics, contour of the vessel, heeling moment, righting moment, moment of force, work force moment, heeling angle, capsizing of a vessel, dynamic stability.

ОПРОКИДЫВАНИЕ морского судна в результате воздействия «волны-убийцы» представляет собой особый случай движения судна на волнении, опасность которого связана с аномальной высотой (до 30 м) таких волн и внезапностью их возникновения. «Волны-убийцы», называемые также *аномально высокими* или *аномальными волнами* [1], могут возникать совершенно неожиданно как в периоды штормовой погоды, так и при достаточно спокойном море. Одной из общепризнанных теорий возникновения аномальных волн является модуляционная неустойчивость, согласно которой вероятность появления таких волн увеличивается с ростом отношения средней крутизны волнения к средней относительной ширине его спектра. В результате модуляционной неустойчивости волн формируется групповой солитон, под огибающей которого может находиться несколько периодов морских волн. Волны центральной части группового солитона претерпевают нелинейное преобразование, в результате которого их высота может увеличиться до 30 м, после чего они разрушаются путем обрушения гребня на подошву волны [1].

Известны многочисленные случаи гибели судов при встрече с аномальными волнами. Так, за период 1969 – 1994 гг. были потеряны или существенно повреждены 22 супертанкера [1]. Для наблюдения за аномальными волнами Европейским союзом был профинансирован проект «MaxWave» [2] по мониторингу поверхности Мирового океана с помощью радарных спутников ERS-1 и ERS-2 Европейского космического агентства. Наблюдения показали, что аномальные волны возникают существенно чаще, чем это прогнозируется теоретически. Например, за период 2006 – 2010 гг. зарегистрировано 78 случаев возникновения аномальных волн [3]. Воздействие аномальной волны на морское судно может проявиться как в опрокидывании, так и нарушении целостности его конструкции за счет возникновения больших давлений в местах удара указанной волны. Если нарушение целостности можно предупредить путем проектирования более прочных судов, то избежать их опрокидывания при встрече с аномальной волной не представляется возможным из-за внезапности возникновения волны и кратковременности подобной встречи. Всё это предопределяет актуальность изучения воздействия аномальных волн на морские суда.

Существующие работы в области изучения воздействия волн на суда можно условно разделить, соответственно используемым методам исследований, на три группы: *аналитические*, *экспериментальные* и *численные*. Из большого числа аналитических работ можно в качестве примера привести статью [4] о нелинейной качке и опрокидывании судна, в которой рассматривается модель поперечной качки судна, нелинейный характер которой реализован путем разложения в ряды момента сил демпфирования, а также восстанавливающего и кренящего моментов. Это позволяет выполнить аналитическое моделирование на регулярном волнении качки модели судна (масштаб 1:15) максимальной амплитудой крена, равной 45°. Данная аналитическая модель не может быть использована для изучения опрокидывания судна под воздействием аномальной волны. Необходимый в этом случае учет амплитуд конечной величины и скорости качки приводит к столь сложным нелинейным граничным условиям, что действующие на судно гидромеханические силы неизбежно оказываются сложными нелинейными функциями перемещений и скорости судна. При этом практически невозможно выполнить разделение сил различной природы. Отдельные категории сил — гидростатические, инерционно-демпфирующие и возмущающие — оказываются взаимосвязанными, зависящими друг от друга. Эта взаимосвязь существенно усиливается, если учитывать вихревые и вязкостные составляющие силового воздействия жидкости, играющие большую роль при поперечной качке судов [5].

В качестве типичного примера исследований, проводимых в опытовом бассейне, можно выделить статью [6] о воздействии аномальной волны на модель судна в масштабе 1:142, в которой рассмотрена технология генерации волн механическим устройством и приведены результаты измерения реакции судна на воздействие волны. Недостатком работы является модельный масштаб её проведения, что затрудняет практическое использование результатов в связи с отсутствием теории подобия для сильно нелинейных процессов опрокидывания судна аномальной волной с учетом вязкости и турбулентности.

В последние десятилетия в практике численных исследований нашел широкое применение метод вычислительной гидродинамики (CFD — *computational fluid dynamics*), который с развитием информационных технологий составляет альтернативу технически сложным и затратным экспериментальным методам. Примером использования CFD-метода может служить работа [7], в которой представлены результаты численного моделирования движения модели судна длиной 3 м на волнении. Недостатком этой и других подобных работ является модельный характер исследований, так как результаты вычислений с учетом вязкости и турбулентности зависят от размера модели. В связи с этим в настоящей работе ставятся следующие задачи:

- разработать технологию полномасштабного моделирования CFD-методом с учетом вязкости и турбулентности опрокидывания контура (мидель-сечения) судна аномальными волнами высотой 30 м на глубокой воде при отсутствии ветра и морского волнения;
- вычислить работу моментов сил, создаваемых на контуре аномальной волной;
- установить возможность использования работы моментов сил для оценки динамической остойчивости контура на аномальной волне.

Решение поставленной задачи выполнено на основе CFD-метода вычислительной гидродинамики. Метод базируется на уравнениях неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*) [8], которые могут быть записаны в следующем виде:

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

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

где $i, j = 1, 2, 3$; x_1, x_2, x_3 — декартовы координаты в абсолютной системе $ox_1x_2x_3$ и соответствующие им u_1, u_2, u_3 — осредненные значения абсолютной скорости поля скорости жидкости; u'_1, u'_2, u'_3 — флуктуации абсолютной скорости; μ и ρ — вязкость и плотность жидкости соответственно; t — время; p — давление; последний член в выражении (2) — напряжение Рейнольдса. Для вычисления напряжения Рейнольдса используется модель турбулентности *RNG*, $k_t - \varepsilon_t$ [7, с. 1113], которая позволяет получать расчетные величины гидродинамических полей, близкие к их экспериментальным значениям.

Для формального описания численной модели выбрана неподвижная правая прямоугольная система координат $oxyz$, совпадающая с системой $ox_1x_2x_3$. В соответствии с поставленной задачей решение системы уравнений (1) и (2) выполнено численным способом в расчетной 2D-области, имеющей форму прямоугольника, сформированного в вертикальной плоскости oxy . Ось ox лежит на условной поверхности спокойной воды (при отсутствии волн), а ось oy совпадает с левой границей расчетной области и направлена вверх. В направлении оси ox от левой границы расчетной области по поверхности воды распространяется аномальная волна. Дополнительно используется еще одна прямоугольная система координат $o\xi\eta$, связанная с контуром, оси которой в начальный момент времени параллельны осям oxy соответственно. Плоскости контура и расчетной области совпадают. Начало системы координат $o\xi\eta$ всегда находится в центре тяжести контура. Угол крена вычислялся как угол между осями oy и $o\eta$. Перемещение центра тяжести контура вычислялось в системе координат oxy .

Для обеспечения численного решения выполнена пространственная дискретизация расчетной области квадратными сеточными элементами за исключением прямоугольной области, охватывающей пространство движения контура, которое разбито треугольными сеточными элементами, перестраиваемыми в процессе движения контура под воздействием аномальной волны. Кроме того, в процессе вычислений предусмотрена временная дискретизация переменных с заданным интервалом времени. Указанные виды дискретизации позволяют выполнить сведение системы уравнений в частных производных (1) и (2) к системе алгебраических уравнений.

Численное решение системы уравнений (1) и (2) предполагает определение на всех границах расчетной области (включая границу контура) граничных и начальных условий. Прежде всего, следует предварительно сформулировать аналитическое описание начального состояния аномальной волны. Как свидетельствуют результаты натурных наблюдений [9, с. 248], чаще встречаются аномальные волны с одним высоким центральным максимумом амплитудой A_b и двумя небольшими боковыми возвышениями. Профиль такой волны в начальный момент времени ($t = 0$) может быть записан в виде

$$w = A_b \exp \left[-2 \left(\frac{k_b (x - x_0)}{2\pi} \right)^2 \right] \cos [k_b (x - x_0)], \quad (3)$$

где A_b , $k_b = 2\pi/\lambda_b$ и λ_b — начальная амплитуда, волновое число и длина волны соответственно; x_0 — координата начального положения центрального максимума волны.

Профиль и амплитуда волны называются *начальными*, поскольку с течением времени за счет нелинейных преобразований изменяются её профиль и амплитуда до аномальных значений. Применение технологии сеточного разбиения к начальному профилю волны (3) позволило получить упорядоченный массив её дискретных значений w_i ($i = 0, \dots, N-1$). Применение к указанному массиву w_i дискретного преобразования Фурье позволило вычислить пространственный спектр Y_n комплексных амплитуд:

$$Y_n = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{2}{N} w_{i+1} \exp(-j2\pi ni/N), \quad n = 0, \dots, N-1, \quad (4)$$

где N и i — число дискретных значений и номер элемента в массиве w_i ($i = 0, \dots, N-1$); j — комплексная единица; n — порядковый номер комплексной амплитуды в спектре Y_n .

Начальный участок спектра Y_n содержит комплексные спектральные амплитуды, длина волн которых составляет сотни метров, что требует для выполнения условий глубокого моря ($h \geq \lambda/2$, h — глубина воды) и создания расчетной области очень больших геометрических размеров. В свою очередь, конечный участок спектра содержит короткие волны, для отображения которых в расчетной области следует выполнять сеточное разбиение с коротким шагом, что, соответственно, приводит к необходимости привлечения значительных вычислительных ресурсов. Исключение боковых спектральных составляющих, не превышающих 5 % от максимальной амплитуды спектра, позволило избежать указанных затруднений и воспроизвести с высокой точностью волну (3), представив её суммой монохроматических поверхностных волн:

$$w = \sum_{n=l}^L A_n \cos(k_n x - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (5)$$

где l и L — номер комплексных амплитуд соответственно левой и правой границы усеченного спектра; $A_n = |Y_n|$ — спектральная амплитуда; $k_n = 2\pi/\lambda_n$ — волновое число; $\sigma_n = \sqrt{gk_n}$ — угловая частота; g — ускорение свободного падения; φ_n — значение фазового угла n -й компоненты спектра. Длина волны спектральной амплитуды, располагающейся в центре спектра (4), называется *длиной центральной волны*, которая соответствует длине λ_b волны (3).

На основе спектра монохроматических волн (5) сформировано на левой границе расчетной области граничное условие в виде геометрического вектора суммы скоростей втекающей жидко-

сти, горизонтальная v_x и вертикальная v_y компоненты которого для глубокой воды определяются выражениями:

$$v_x = \sum_{n=1}^L \frac{gk_n A_n}{\sigma_n} \exp(k_n y) \cos(k_n x_e - \sigma_n t + \varphi_n); \quad (6)$$

$$v_y = \sum_{n=1}^L \frac{gk_n A_n}{\sigma_n} \exp(k_n y) \sin(k_n x_e - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (7)$$

где x_e — координата левой границы расчетной области.

Граничное условие на выходе расчетной области (правая граница) обеспечивается введением дополнительного затухания, исключающего отражение волн от границы. Граничные условия дна расчетной области соответствует условию непротекания — нулевому значению нормальной производной скорости жидкости, а для верхней границы — атмосферному давлению открытого пространства. Граничное условие на поверхности контура соответствует условию свободно плавающего твердого тела с заданными геометрическими и массинерционными свойствами. В соответствии с моделью *DOF* (*Degrees of Freedom*) [7, с. 1113] на каждом временном шаге вычисляются давление на поверхности периметра контура (контур имеет толщину 1 м), а также сила и момент силы относительно центра тяжести свободно плавающего контура. Полученные значения являются основанием для вычисления векторов линейных и угловых перемещений и соответствующих им скоростей и ускорений контура. Граничное условие на свободной поверхности воды вычислялось в соответствии с моделью *VOF* (*Volume of Fluid*) [7, с. 1112 – 1113]. Начальные условия уравнений (1) и (2) сформированы путем инициализации расчетной области от вектора скорости (6) и (7), в результате чего в расчетной области создавалось распределение скоростей, соответствующее начальному состоянию аномальной волны (3).

Для определения длин и начальных амплитуд волн вида (3), высота которых в процессе нелинейного преобразования достигает 30 м, выполнено численное моделирование на базовых волнах с одинаковой длиной центральной волны $\lambda_b = 100$ м и высотой $A_b = 8, 9, 10, 11$ и 12 м и крутизной относительно второго максимума 0,496; 0,608; 0,673; 0,725; 0,785 соответственно. Выбор указанных начальных амплитуд обусловлен тем, что для волн высотой менее 8 м (крутизна второго максимума менее 0,4) характерно отсутствие возрастания их высоты за счет слабых нелинейных преобразований, что исключает их из категории аномальных волн. Кроме того, для волн с амплитудой более 12 м (крутизна более 0,8) характерно сильное нелинейное преобразование, вследствие которого происходит стремительное возникновение и смыкание первого и второго максимумов (далее приведены пояснения о числе максимумов аномальной волны) волны с последующим их обрушением, что предопределяет короткий интервал времени жизни аномальной волны.

В процессе моделирования процессов развития и обрушения каждой из указанных базовых волн вычислены значения их высот H_b , соответствующие второму максимуму волн. Из выражения $m = 30/H_b$ определен массив масштабирующих коэффициентов m . Применение указанных масштабирующих коэффициентов одновременно к начальной амплитуде A_b и длине λ_b каждой базовой волны позволило получить ряд начальных значений амплитуд $A_m = mA_b$ и длин $\lambda_m = m\lambda_b$ центральных волн, при этом крутизна масштабированных волн осталась равной крутизне базовых волн. Для каждой масштабированной волны по формулам (4) – (7) был вычислен спектр, ряд монохроматических волн и соответствующие ему скорости втекающей воды. В результате длины центральных волн λ_m для аномальных волн с высотой второго максимума, равной 30 м, составили ряд значений: 120, 130, 140, 155 и 190 м.

В спектре масштабированных волн оставлены монохроматические волны в диапазоне длин от 500 м до 50 м. Для обеспечения условий глубокого моря расчетная область выполнена в виде прямоугольника длиной 1000 м, высотой воздушного пространства 100 м и глубиной воды 250 м. Расчетное пространство разбито квадратными сеточными элементами со стороной 0,5 м, за исключением внутренней области длиной 300 м и высотой 50 м, охватывающей пространство движения контура, которое разбито равносторонними треугольными сеточными элементами со

стороной 0,5 м. Треугольные сеточные элементы обеспечивают возможность периодической перестройки сетки в процессе движения контура. Шаг дискретизации времени Δt выбран равным 0,0005 с, при котором на каждом временном шаге максимальное число Куранта ($C = \Delta t v_{\max} / d$, где $v_{\max}$ — максимальное значение скорости жидкости в канале, d — сторона сеточной ячейки) не превышало 0,25, что обеспечило высокую точность вычислений. Плотность воды принята $\rho = 1027 \text{ кг/м}^3$, ускорение свободного падения — $g = -9,81 \text{ м/с}^2$.

Для детального рассмотрения процесса опрокидывания из середины ряда длин базовых волн выбрана волна амплитудой $A_b = 10 \text{ м}$ и длиной $\lambda_b = 100 \text{ м}$, обладающая типичным характером нелинейного развития. При использовании в соответствии с разработанной технологией вместе с базовой волной вычисленного значения масштабирующего коэффициента $m = 1,4$, получили начальную амплитуду аномальной волны $A_m = 14,0 \text{ м}$ и длину центральной волны спектра — $\lambda_m = 140 \text{ м}$. В процессе нелинейного преобразования высота второго максимума указанной волны достигает 30 м. В качестве объектов воздействия аномальной волны выбраны из таблицы контуры толщиной 1 м рыбопромысловых судов [10, с. 1], для которых характерно длительное пребывание в море, что увеличивает вероятность их встречи с аномальной волной. Численное моделирование показало, что движение контуров под воздействием аномальных волн имеет типичные признаки, рассмотренные на примере контура 3, параметры которого приведены в таблице для супертраулера типа «Моонзунд» водоизмещением 9260 т.

Параметры контуров рыболовных судов

Номер контура	Тип и водоизмещение судов, т	Параметры контуров толщиной 1 м					начальная метacentрическая высота, м
		ширина, м	высота, м	осадка, м	масса, кг	момент инерции, кг·м ²	
1	БСТ тип «Каури», 3040	13,5	8,9	6,25	82658	1719196	0,75
2	БМРТ тип «Иван Бочков», 4947	15,9	10,0	5,66	88277	2718078	1,0
3	РТМС тип «Моонзунд», 9260	19,0	12,2	6,60	123683	5693432	1,0

В процессе нелинейного преобразования высота указанной аномальной волны достигает высоты 30 м (рис. 1 — профили 2 и 4). Численное моделирование опрокидывания контура 3 аномальной волной было выполнено в двух вариантах. Первый вариант, когда начальное положение контура соответствовало x -координате первого максимума, второй — x -координате второго максимума.

В первом варианте контур подвергается непосредственному воздействию первого максимума волны. При этом уходящая волна увлекает контур, воздействуя косвенно на него также вторым максимумом. Во втором варианте приближающийся первый максимум формирует предварительное воздействие на контур, а второй оказывает на него основное воздействие.

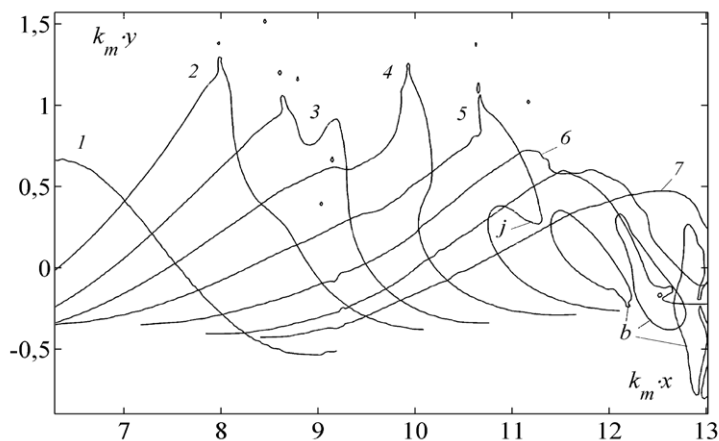


Рис. 1. Временная последовательность профилей аномальной волны ($k_m = 2\pi/\lambda_m$, $\lambda_m = 140 \text{ м}$)

На рис. 1 – 5 выполнена сквозная нумерация моментов времени 1 – 7. Каждый номер соответствует одному и тому же моменту времени на всех рисунках. Изначально эти моменты времени соответствуют моментам последовательного формирования профилей (см. рис. 1), что обеспечивает наглядность анализа результатов и синхронность рассмотрения нелинейного развития волны без контура и с контуром.

Первый вариант. На рис. 2 приведена эволюция момента сил M относительно центра тяжести контура и работы $T = \int_0^{\theta} M d\theta$ указанного момента и угла крена θ . Последний является функцией от относительного времени (t/τ , где τ — период центральной волны), что позволяет представить кривые момента M и работы T на рис. 2 в двух вариантах: рис. 2 а — в зависимости от относительного времени; рис. 2 б — от угла крена контура, что обеспечивает наглядность анализа процесса воздействия аномальной волны на контур.

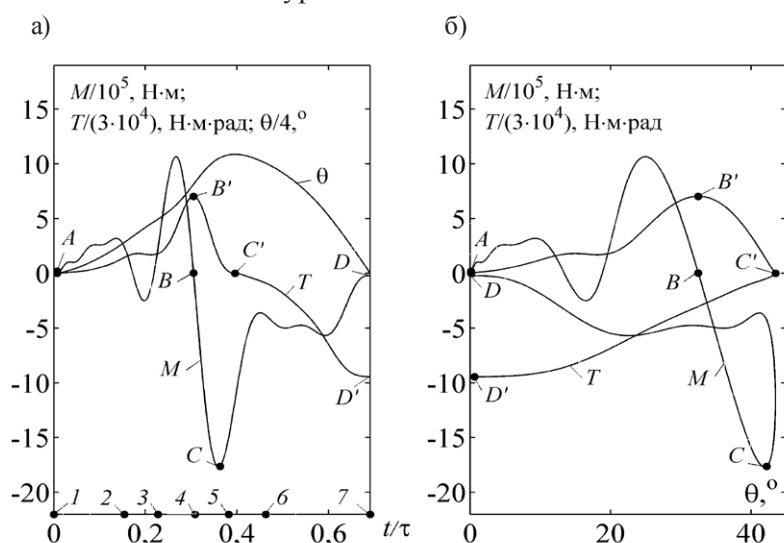


Рис. 2. Эволюция параметров движения контура в процессе воздействия аномальной волны

На рис. 3 представлена последовательность профилей волны и контура. Начальный момент обозначен на рисунках номером 1. Момент времени 2 (см. рис. 1) соответствует формированию первого максимума — моменту, когда x -координата первого максимума аномальной волны сравнялась с x -координатой контура. В результате воздействия аномальной волны контур получил крен, равный 10° . В момент времени 2 на кривой момента M и работы T регистрируются слабо выраженные первые максимумы (см. рис. 2), вслед за которыми происходит снижение величины момента вплоть до отрицательных значений, что обусловлено резким снижением высоты аномальной волны (см. рис. 1 — интервал времени 2 – 3). Тем не менее, за счет приобретенной инерции продолжается увеличение крена θ контура — интервал времени 2 – 3 на рис. 2 и 3.

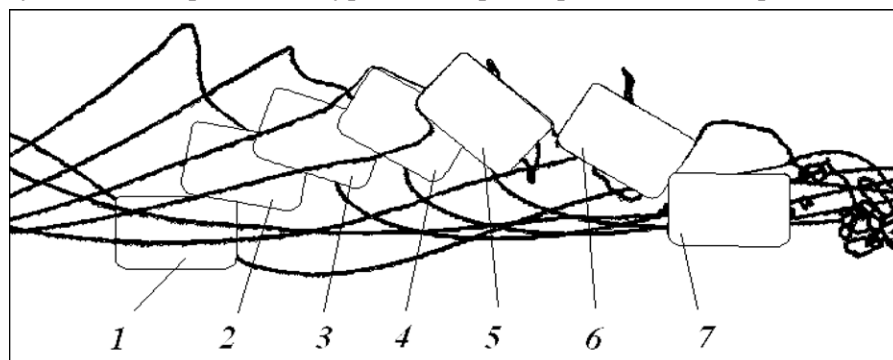


Рис. 3. Временная последовательность профилей контура и аномальной волны

На интервале времени 3 – 4 имеет место резкое увеличение воздействия аномальной волны за счет роста её высоты, что нашло выражение в росте момента и работы (см. рис. 2 а). К концу интервала 3 – 4 за счет прекращения роста высоты волны обозначилось быстрое снижение значений момента M (точка B на рис. 2). К концу указанного интервала сформировался второй ярко выраженный максимум работы T (точка B' на рис. 2). Начальное положение контура для первого варианта привело к нарушению поля скорости в аномальной волне к моменту формирования второго максимума. В связи с этим на интервале времени 4 – 5 (см. рис. 1 и 3) произошло уменьшение высоты аномальной волны и потеря её энергии, вследствие чего момент сил M на интервале 4 – 5 (участок кривой BC на рис. 2) достиг своего минимального отрицательного значения в точке C .

Вычисляемый момент сил является граничным условием на контуре, которое записывается [11, с. 129] в виде $I\alpha = M$, где I — момент инерции массы контура; α — ускорение угла крена. Качественно структуру момента сил M и его работы T можно представить выражениями:

$$M = M_h - M_r - M_{id} \text{ и } T = T_h - T_r - T_{id}, \quad (8)$$

где M_h и T_h — кренящий момент и его работа; M_r и T_r — восстанавливающий момент и его работа; M_{id} и T_{id} — инерционно-демпфирующий момент и его работа соответственно.

Согласно выражениям (8) момент сил M (работу T) можно представить как результат конкуренции кренящих и восстанавливающих моментов (работ). Тогда снижение величины работы T до нуля на участке $B'C'$ (см. рис. 2) можно рассматривать как результат увеличения T_r , вплоть до равенства $T_r = T_h - T_{id}$ в точке C' . Объяснение причины формирования на участке BC отрицательных значений момента M состоит в том, что величина восстанавливающего момента M_r , включая и M_{id} , превысила значения кренящего момента M_h за счет уменьшения последнего на интервале 4 – 5 по ранее указанным причинам. Точка C' , в которой работа от конкурирующих моментов обращается в нуль, соответствует максимуму угла θ крена и минимуму момента сил M . На интервале 5 – 7 происходит разрушение аномальной волны — струя воды ударяет в подошву волны, захватывая воздушные пузыри (области b на рис. 1).

Следует отметить, что за счет потери кинетической энергии наблюдается снижение воздействия аномальной волны на контур, вследствие чего на интервале 5 – 7 (см. рис. 2) сохраняется отрицательное значение момента сил M на участке CD , т.е. сохраняется преобладание восстанавливающего момента над кренящим. На участке $C'D'$ формальное изменение знака работы в выражении (8) на противоположный ($T < 0$) является результатом преобладания работы восстанавливающего момента над работой кренящего момента, в результате которого прекращается накренение и происходит восстановление начального крена контура.

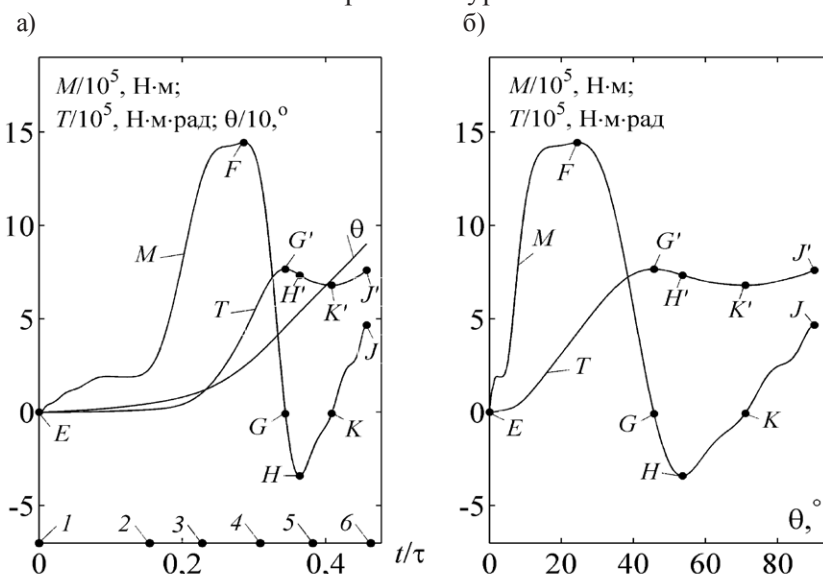


Рис. 4. Эволюция параметров движения контура в процессе воздействия аномальной волны: а — в зависимости от относительного времени t/τ ; б — в зависимости от угла крена контура

Второй вариант отличается от первого тем, что контур не подвергался непосредственному воздействию первого максимума и последующему за ним снижению высоты аномальной волны (моменты времени 2 и 3 на рис. 1 и 5), что позволяет аномальной волне свободно развиваться вплоть до формирования второго максимума. В эти моменты времени контур находился на фронте волны, что обусловило развитие небольшого крена контура и подъём кривой момента M (моменты времени 2 и 3 на рис. 4 и 5). На интервале 3 – 4 имеет место резкое увеличение высоты аномальной волны (интервал 3 – 4 на рис. 1), при этом к моменту времени 4 положение контура сравнялось с положением второго максимума, вследствие чего контур получил основное воздействие аномальной волны, а момент сил M достиг своего максимума (точка F на рис. 2). Вследствие указанных причин контур сместился вверх и получил дополнительный крен (интервал 3 – 4 на рис. 5).

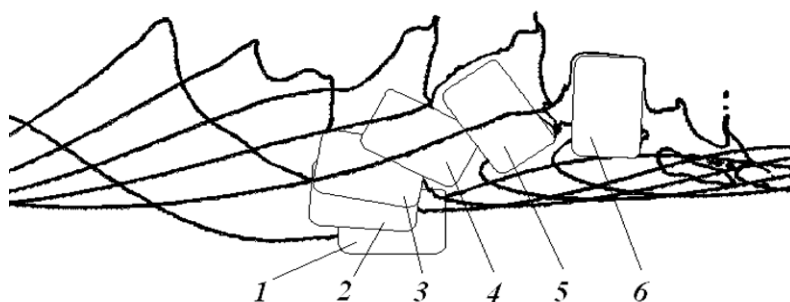


Рис. 5. Временная последовательность профилей контура и аномальной волны

На участке кривой FG (интервал 4 – 5 на рис. 4) отмечается резкое снижение величины момента M , обусловленное прекращением роста высоты волны к концу интервала 3 – 4 (см. рис. 1), который в точке G (см. рис. 4) достиг нулевого значения. На участке GHK момент сил M приобрел отрицательные значения за счет преобладания восстанавливающего момента M_p , включая M_{id} , над кренящим M_h моментом. В эти моменты времени начинается обрушение аномальной волны, её кинетическая энергия расходуется на образование струи ныряющего буруна. Соответственно на участке $G'H'K'$ отмечается некоторое снижение работы T . Обрушение волны сопровождалось увеличением горизонтальной компоненты вектора скорости воды, что привело к росту момента сил, работы на участках кривых KJ и KJ' и, соответственно, к опрокидыванию контура (интервал 5 – 6 на рис. 5). Таким образом, сохранение знака работы T свидетельствует в данном случае о неудовлетворительной остойчивости контура на аномальной волне.

Движение контура под действием аномальной волны можно условно разделить на три этапа (см. рис. 3 и 5). Первый этап — интервал времени 1 – 3, на протяжении которого контур поднимается на волну и наклоняется на угол до 20° . На втором этапе — интервал времени 3 – 5 — контур, увлекаемый волной, интенсивно смещается, получая крен до 50° . На этом этапе абсолютное значение момента сил достигает своих максимальных значений. На третьем этапе (интервал времени 5 – 7) контур опрокидывается, если работа момента сил сохраняет знак.

Динамические свойства первого и второго максимумов отличаются тем, что скорости жидкости в волне второго максимума превышают в 1,5 раза скорости жидкости первого максимума. Кроме того, на фронте волны, достигающей второго максимума, на интервале времени 4 – 5 (см. рис. 1 и 5) формируется зона повышенной скорости жидкости, превышающей фазовую скорость фронта аномальной волны, вследствие чего образуется струя j (см. рис. 1). За счет воздействия во втором варианте на контур более высоких скоростей жидкости, а также зоны повышенной скорости на интервале 4 – 7 (см. рис. 1 и 5) происходит дальнейшее увеличение крена контура вплоть до опрокидывания. В связи с этим для оценки максимального воздействия аномальной волны на контуры, приведенные в таблице (с. 36), было выполнено численное моделирование опрокидывания контуров аномально высокими волнами длиной 120, 130, 140, 155 и 190 м по второму варианту.

На рис. 6 приведены полученные зависимости конечного значения (для $\theta = 90^\circ$) работы T от крутизны аномальных волн, явившихся причиной опрокидывания контуров. Параметром диаграмм является порядковый номер контура, приведенный в таблице.

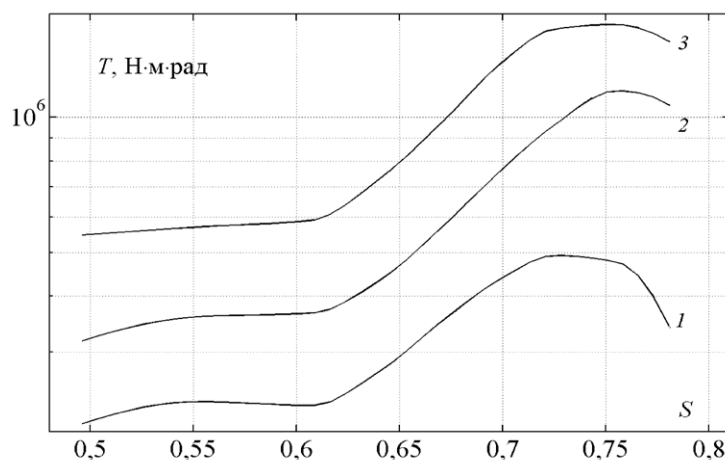


Рис. 6. Зависимость от крутизны аномальных волн работы T моментов сил

Установлено, что энергии аномальных волн рассматриваемого диапазона крутизны достаточно для опрокидывания контуров судов водоизмещением от 3040 до 9260 т. Следует отметить, что в процессе воздействия аномальных волн работа T моментов сил не меняла знак, что соответствует развитию процесса опрокидывания контура. Начиная с крутизны 0,6 аномальных волн, наблюдается резкое увеличение работы T , обусловленное формированием ныряющего буруна большой интенсивности, оказывающего существенное опрокидывающее воздействие на контуры. Снижение работы T для аномальных волн крутизной 0,750 – 0,780 связано с особенностями нелинейных преобразований таких волн, для которых характерно сильное нелинейное преобразование, вследствие которого происходит ускоренное возникновение первого и второго максимумов волны, что предопределяет короткий интервал времени воздействия аномальной волны на контур.

Таким образом, классический метод оценки динамической остойчивости состоит в сопоставлении работ кренящего и восстанавливающего моментов. Для оценки остойчивости контура на аномальной волне воспользоваться им не представляется возможным в связи с тем, что при больших углах крена контура аналитическая модель качки приобретает большую нелинейность, что не позволяет вычислить отдельно точные значения работ кренящего и восстанавливающего моментов. На основе анализа полученных результатов численного моделирования можно сделать вывод о том, что характер эволюции работы момента сил, действующих на контур, можно применять для оценки динамической остойчивости контура на аномальной волне. Сохранение знака работы момента сил, приложенных к контуру, соответствует процессу опрокидывания, а его изменение — восстановлению начального крена контура.

Результаты численного моделирования свидетельствуют о существенной зависимости устойчивости контура на аномальной волне от его начального положения относительно волны. Изменение начального положения контура всего на треть длины аномальной волны (смещение начального положения со второго на первый максимум) исключает его опрокидывание. Время жизни аномальной волны высотой 30 м на глубокой воде не превышает одного периода, а длина пробега составляет не более длины центральной волны. Всё это в целом уменьшает вероятность опрокидывания судов при встрече с аномальной волной. Принимая во внимание метод плоских поперечных сечений, можно предположить, что полученные результаты для контуров относятся также и к оценке динамической остойчивости судов на аномальных волнах. Поэтому разработанная технология и полученные результаты могут быть использованы для оценки динамической остойчивости проектируемых судов.

Список литературы

1. Пелиновский Е. Н. «Фрики» — морские волны-убийцы / Е. Н. Пелиновский, А. В. Слюняев // Природа. — 2007. — № 3. — С. 14–23.
2. Rosenthal W. Rogue Waves: Results of the MaxWave Project / W. Rosenthal, S. Lehner // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2008. — Vol. 130.
3. Nikolkina I. Rogue waves in 2006 – 2010 / I. Nikolkina, I. Didenkulova // Natural hazards and Earth system sciences. — 2011. — Vol. 11.
4. Buca M. P. Nonlinear Ship Rolling and Capsizing / M. P. Buca, I. Senjanovic // Brodogradnja. — 2006. — № 4 (57). — P. 321–331.
5. Справочник по теории корабля: в 3 т. — Т. 2. Статика судов. Качка судов / Под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 440 с.
6. Minami M. Study of ship responses and wave loads in the freak wave / M. Minami, H. Sawada, K. Tanizawa // Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, California, USA. — 2006. — P. 272–278.
7. Ming Wu. Prediction of Ship Motions in Head Waves Using RANS Method / Ming Wu, Bo Yang, Zuochao Wang, Aiguo Shi, Xiao Wang // Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece. — 2012. — P. 1112–1117.
8. Blazek J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications / J. Blazek. — Elsevier, 2001. — 440 p.
9. Fonseca N. Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions / N. Fonseca, C. G. Soares, R. Pascoal // Journ. Mar. Sci. Technol. — 2006. — № 11. — P. 245–259.
10. Справочник судов [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <http://www.fishportal.ru/ships>.
11. Луговский В. В. Гидродинамика нелинейной качки судов / В. В. Луговский. — Л.: Судостроение, 1980. — 256 с.

УДК 656.61.052

С. В. Ермаков,
ст. преп.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАНЕВРА ПОСЛЕДНЕГО МОМЕНТА С ПАССИВНЫМ ФАКТОРОМ

MATHEMATICAL MODEL OF LAST MOMENT MANEUVER WITH PASSIVE FACTOR

Рассмотрена сущность и даны два определения понятия «маневр последнего момента»: как идеального (теоретического) и как реального (практического) маневра. Обоснованы его основные характеристики. Предложена классификация маневра последнего момента в зависимости от обстоятельств возникновения необходимости в его осуществлении, основанная на его формализации в Международных правилах по предупреждению столкновения судов в море, 1972 г. (МППСС-72) и на содержащейся в них регламентации действий судоводителя при выполнении маневра последнего момента. Обоснована математическая модель маневра последнего момента, которая позволяет по элементам движения сходящихся на пересекающихся курсах судов и характеристикам нашего судна, а также с учётом глубины акватории маневрирования определить дистанцию для начала этого манёвра. Выполнена оценка возможности учета в предложенной математической модели человеческого фактора и потенциальной области применения этой модели.

The essence of last moment maneuver was considered, the two definitions of this concept (as the ideal (theoretical) and real (practical) maneuver) was given. Justified its main characteristics. The classification of maneuver last moment depending on the circumstances of occurrence of the need for its implementation was proposed. This classification is based on the formalization of maneuver in the International Rules of Preventing Collision at Sea and contained in these rules regulating the actions of navigator when maneuvering the last moment.

Mathematical model of last moment maneuver was grounded. This model allow to determine the distance to the start of this maneuver by elements of movement converging on intersecting courses of vessels and our vessel characteristics, as well as taking into account the depth of the water area-maneuvering-integration. An assessment of the accounting in the proposed mathematical model of the human factor and the potential scope of this model was performed.

Ключевые слова: маневр последнего момента, определение, классификация, математическая модель.
Key words: last moment maneuver, definition, classification, mathematical model.

В МОРСКОЙ практике и науке термины «манёвр последнего момента» (МПМ) или «момент последних мгновений» являются далеко не новыми. Однако в литературе отсутствует чёткое и единообразное определение термина «манёвр последнего момента», под которым обычно понимают маневрирование, направленное на предотвращение столкновения судов при неожиданно определённой визуальной угрозе их столкновения на малых расстояниях, когда на обдумывание или решение задачи нет времени и нужно действовать мгновенно, применяя сильные манёвры «*лево или право на борт*», «*полный задний ход*», а чаще их сочетание [1], [2]. Авторы данных работ считают, что именно в этом состоит смысл МПМ. Однако здесь необходимо признать, что данное определение является наиболее полным и соответствующим норме из всех предложенных в литературе. Обобщая остальные, можно свести их к следующей формулировке: «*манёвр, экстренное выполнение которого необходимо для предотвращения столкновения*». Отсутствие различий в лингвистических формализациях термина «манёвр последнего момента» можно кратко объяснить множеством его характеристик: туманное, абстрактное, неуловимое [3].

Цель МПМ — расхождение не безопасное, а безаварийное, т. е. главное — избежать касания, а не разойтись в расстоянии, большем заданного. Цель МПМ достигнута, даже если суда разошлись в 0,5 м друг от друга. При этом эффективность МПМ обеспечивается не только его началом в «последний момент» на некоторой дистанции между судами, так называемой *дистанции манёвра последнего момента* $D_{\text{МПМ}}$, но и движением судна по оптимальной, наиболее удалённой от встречного судна, траектории. Очевидно, что манёвр на расхождение можно считать успешным (безаварийным), если он начался ранее «последнего момента». Формально такой маневр не является МПМ. В случае, если произошло столкновение, «последний момент» был пропущен и предшествующий столкновению манёвр также не может считаться МПМ. Таким образом, строгого (идеального) манёвра последнего момента в практике судовождения не существует, это понятие не реальное, а идеальное и виртуальное. Практически всегда у судна и судоводителя либо остается хоть и минимальный запас времени и расстояния (при итоговом безаварийном расхождении), либо происходит столкновение. Приведённые ранее выводы о сущности МПМ позволяют сформулировать его двоякое определение (лингвистическую формализацию). МПМ в узком (теоретическом) смысле — «точечный» идеальный виртуальный манёвр на расхождение со встречным судном, который при движении привилегированного судна по оптимальной, наиболее удалённой от встречного судна, траектории обеспечит безаварийное расхождение с ним на минимально достаточной для этого дистанции. Оптимальная траектория движения нашего судна здесь определяется таким режимом работы главного двигателя, положением винта регулируемого шага и пера руля, любое изменение которых приведёт к уменьшению дистанции расхождения. В свою очередь, под минимально допустимой дистанцией расхождения необходимо понимать такую дистанцию, увеличение которой на некоторую бесконечно малую величину ΔD ($\Delta D \rightarrow 0$) приведёт к аварии.

Характеристиками МПМ в этом смысле являются *дистанция и время манёвра последнего момента* $D_{\text{МПМ}}$ и $t_{\text{МПМ}}$, т.е. дистанция между судами и время, соответствующие началу выполне-

ния этого манёвра. В широком, более практическом смысле под манёвром последнего момента необходимо понимать манёвр, направленный на безаварийное расхождение, характеризующийся дистанцией начала манёвра $D_{\text{МПМ}}^I$, которая находится в диапазоне $D_{\text{МПМ}} \leq D_{\text{МПМ}}^I < D_{\text{доп}}$. Здесь $D_{\text{доп}}$ — дистанция, т. е. заданное (нормированное) минимальное расстояние между судами при начале маневрирования, на котором обязанным судном будет обеспечено расхождение судов на заданной для текущих условий плавания безопасной дистанции.

К понятию МПМ можно считать имеющими отношение ч. (a (ii)) и (b) правила 17 МППСС-72 [4], [5], которые разрешают привилегированному судну совершить манёвр на расхождение, если судно, которое обязано уступить дорогу, не предпринимает никаких действий, и обязывают совершить любой манёвр судну, которое должно сохранять курс и скорость, если оно находится опасно близко к другому судну. Однако проведённый анализ показывает, что научные определения МПМ в качестве условия возникновения необходимости в этом манёвре, как правило, указывают на внезапное появление угрозы столкновения. Вместе с тем, это условие не согласуется с положениями правила 17 МППСС-72 [4], в котором внезапность практически исключена. При этом противоречие здесь отсутствует, поскольку в обоих случаях речь идёт о МПМ, только с различной детерминантой. Исходя из этого, в целях исследования МПМ предлагается использовать следующую его классификацию:

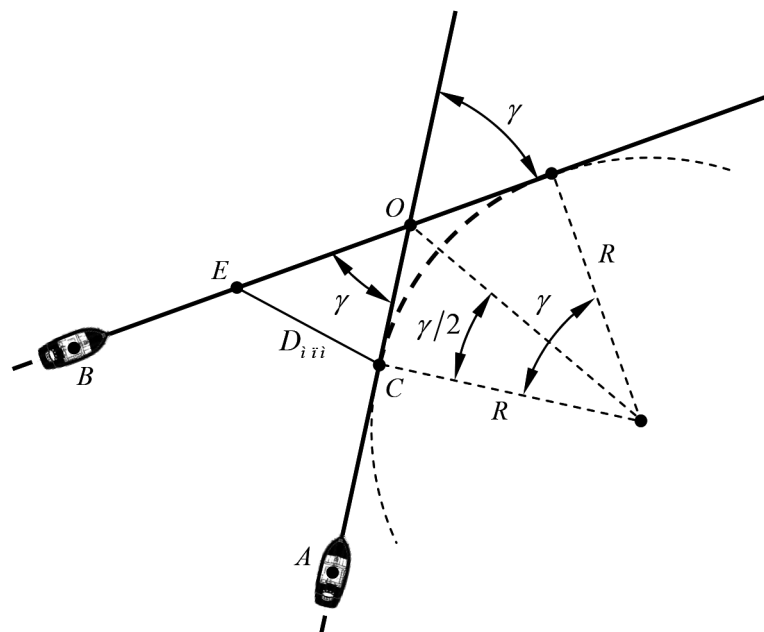
- МПМ, когда маневрирование обусловлено неисполнением своих обязанностей, т. е. бездействием обязанного судна (назовём его *МПМ с пассивным фактором*, или *ожидаемый МПМ*);
- МПМ, когда маневрирование обусловлено внезапно появившейся опасностью, возникшей, например, вследствие «неправильного» манёвра встречного судна (такой манёвр назовём *МПМ с активным фактором*, или *не ожидаемый МПМ*).

Очевидно, что построить математическую модель МПМ с активным фактором довольно затруднительно. В свою очередь, для решения задачи обоснования математической модели ожидаемого МПМ сделаем следующие допущения:

- обязанное судно в процессе расхождения (включая маневрирование нашего судна) не меняет свой курс, т. е. следует прямолинейно;
- маневрирование нашего судна происходит только курсом;
- расхождение считаем успешным (безаварийным), если курс нашего судна в итоге не пересечёт курс обязанного судна, т. е. линия его пути в случае манёвра последнего момента будет касательной к криволинейной траектории нашего судна;
- траекторию нашего судна при расхождении принимаем за окружность постоянного радиуса;
- путевые углы равны курсам судов, т. е. пренебрегаем действием ветра и течения.

Большинство из указанных допущений согласуются с концепцией МПМ, предложенной В. О. Раммом и Е. М. Лушниковым [6], а также А. С. Мальцевым [7].

Рассмотрим ситуацию сближения судов, приведенную на рисунке. Пусть в некоторый момент времени на привилегированном судне, находящемся в точке A (на судне A), обнаружена опасность столкновения в точке O с судном, находящимся в точке B (с судном B). Судно B в рассматриваемой ситуации должно уступить дорогу, то есть является обязанным судном. Однако, если оно по каким-либо причинам, не изменяющим обязательный статус судна, не предпримет действий на расхождение, манёвр должно осуществить судно A . При этом последней точкой по ходу движения судна A , обеспечивающей безаварийное расхождение, является точка C . При переключке руля на борт и начале циркуляции радиусом R , соответствующим такой переключке из точки C , прямолинейная траектория движения судна B окажется касательной по отношению к криволинейной траектории судна A . При выходе на циркуляцию в более поздний момент времени траектории судов пересекутся.



К определению дистанции маневра последнего момента

Пусть суда сближаются под некоторым углом γ относительно друг друга, тогда непосредственно из рисунка можно получить:

$$OC = R \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2); \quad (1)$$

$$EC = \sqrt{OE^2 + OC^2 - 2OE \cdot OC \cdot \cos^3 \gamma}. \quad (2)$$

Расстояния OE и OC суда при отсутствии маневрирования проходят за один промежуток времени τ . Таким образом, можно записать

$$\tau = OC/v_1 = OE/v_2,$$

где v_1, v_2 — скорости привилегированного (нашего) и обязанного судна соответственно.

Откуда

$$OE = \frac{v_2}{v_1} OC$$

или, с учётом (1),

$$OE = (v_2/v_1) \cdot R \cdot \operatorname{tg}^3(\gamma/2). \quad (3)$$

Подставляя выражения (1) и (3) в формулу (2), получим

$$EC = R \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2) \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}. \quad (4)$$

Формула (4), по сути, определяет дистанцию МПМ между судами (его оценку), соответствующую МПМ привилегированного судна:

$$\bar{D}_{\text{МПМ}} = R \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2) \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}. \quad (5)$$

Один из аргументов в формуле (5) — радиус циркуляции R . Однако использование вместо R радиуса $R_{\text{уст}}$ установившейся циркуляции будет крайне ошибочным, так как установившаяся циркуляция имеет место только после разворота судна на 180° и более, а при манёвре последнего момента привилегированное судно совершает манёвр с изменением курса не более чем на 90° .

Кривая эволюционного периода циркуляции представляет собой кривую переменного радиуса кривизны:

$$R(\psi) = K(\psi)R_{\text{уст}}, \quad (6)$$

где $K(\psi)$ — переменный коэффициент (относительный радиус неустановившейся циркуляции); ψ — разность между исходным и мгновенным курсом (мгновенное значение угла поворота).

Для определения относительных значений радиусов неустановившейся циркуляции в зависимости от угла поворота судна и угла перекладки руля, как правило, используется табл. 1 [8], [9].

Таблица 1

Значения относительных радиусов неустановившейся циркуляции

Угол перекладки руля, град.	Угол поворота судна, град.					
	5	10	30	60	90	120 – 160
35	2,20	1,80	1,30	1,15	1,10	1,06
15	4,40	3,20	1,90	1,60	1,40	1,30

Принимаем, что перекладке руля «на борт» соответствует угол перекладки, равный 35° . Тогда, аппроксимируя степенной функцией при помощи MS Excel значения первой строки табл. 1 до 90° , получим следующую функцию для определения мгновенного значения относительного радиуса неустановившейся циркуляции:

$$K(\psi) = 3,1864\psi^{-0,2465}. \quad (7)$$

Вместе с тем, мгновенное значение радиуса неустановившейся циркуляции, которое можно получить, используя выражения (6) и (7), также нельзя напрямую использовать для вычисления по формуле (5) критического расстояния МПМ. Однако представление мгновенного значения относительного радиуса в виде (7) позволяет вычислить средние значения относительного и абсолютного радиусов для угла поворота γ :

$$K_{\text{cp}}(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \int_0^\gamma 3,1864\psi^{-0,2465} d\psi = 4,229\gamma^{-0,2465}; \quad (8)$$

$$R_{\text{cp}}(\gamma) = 4,229\gamma^{-0,2465}R_{\text{уст}}. \quad (9)$$

Для расчёта радиуса установившейся циркуляции будем использовать эмпирическую формулу Шенхера [9]:

$$R_{\text{уст}} = \frac{K_1 \cdot \Delta}{C_y \cdot A_p \cdot \cos \delta_p}, \quad (10)$$

где Δ — объёмное водоизмещение судна; C_y — коэффициент подъёмной силы пера руля; A_p — площадь пера руля; δ_p — угол поворота руля; K_1 — эмпирический коэффициент, зависящий от отношения $\Delta/A_d \cdot L$ и определяемый по табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициента K_1

$\Delta/A_d \cdot L$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
K_1	1,41	1,10	0,85	0,67	0,55	0,46	0,40	0,37	0,36	0,35	0,34

При этом

$$A_d = C_d \cdot L \cdot d_{\text{cp}}, \quad (11)$$

где C_d — коэффициент полноты диаметральной плоскости.

Площадь пера руля определяется по формуле

$$A_p = L \cdot d_{cp} / A, \quad (12)$$

где A — эмпирический коэффициент.

Эмпирический коэффициент определяется по формуле

$$A = 100 / \left(1 + 25 / (L / B)^2\right). \quad (13)$$

Коэффициент подъемной силы пера руля C_y может быть вычислен следующим образом:

$$C_y = 0,08 \delta_p / (1 + 1,1 / \lambda_p), \quad (14)$$

$$\text{где } \lambda_p = h_p^2 / A_p. \quad (15)$$

Подставляя выражения (11) – (15) в формулу (10) и принимая $h_p = 0,7d_{cp}$, получим

$$R_{уст} = \left[25K_1 \Delta \left(50 + 1,12L \left(1 + (5B/L)^2 \right) / d_{cp} \right) \right] / \left[\delta_p L d_{cp} \left(1 + (5B/L)^2 \right) \cos \delta_p \right]. \quad (16)$$

С учётом (16) выражение (9) принимает следующий вид:

$$R_{cp}(\gamma) = \left[105,725K_1 \Delta \left(50 + 1,12L \left(1 + (5B/L)^2 \right) / d_{cp} \right) \right] / \left[\delta_p L d_{cp} \gamma^{0,2465} \left(1 + (5B/L)^2 \right) \cos \delta_p \right]. \quad (17)$$

Подставляя выражение (17) в формулу (5), получим

$$\bar{D}_{МПМ} = \frac{105,725 \operatorname{tg}(\gamma/2) K_1 \Delta \left(50 + 1,12L \left(1 + (5B/L)^2 \right) / d_{cp} \right) \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}}{\delta_p L d_{cp} \gamma^{0,2465} \left(1 + (5B/L)^2 \right) \cos \delta_p}$$

или с учётом ранее принятого $\delta_p = 35^\circ$:

$$\bar{D}_{МПМ} = \frac{3,688 \operatorname{tg}(\gamma/2) K_1 \Delta \left(50 + 1,12L \left(1 + (5B/L)^2 \right) / d_{cp} \right) \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}}{L d_{cp} \gamma^{0,2465} \left(1 + (5B/L)^2 \right)}.$$

Упростив последнее выражение, получим

$$\bar{D}_{МПМ} = \frac{3,688 \operatorname{tg}(\gamma/2) K_1 \Delta L \left(50L d_{cp} + 1,12L^2 + 28B^2 \right) \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}}{d_{cp}^2 \gamma^{0,2465} \left(L^2 + 25B^2 \right)}. \quad (18)$$

Во избежание необходимости использования данных табл. 2, аппроксимируем её при помощи MS Excel:

$$K_1 = -1519 \cdot \left(\Delta / C_d L^2 d_{cp} \right)^3 + 622,96 \left(\Delta / C_d L^2 d_{cp} \right)^2 - 85,926 \Delta / C_d L^2 d_{cp} + 4,3384. \quad (19)$$

Окончательно совмещая (18) и (19), что, во избежание громоздкости при практических расчётах необязательно, получим

$$\begin{aligned} \bar{D}_{МПМ} = & \frac{3,688 \operatorname{tg}(\gamma/2) \Delta \left(50L d_{cp} + 1,12L^2 + 28B^2 \right) \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}}{d_{cp}^2 \gamma^{0,2465} \left(L^2 + 25B^2 \right)} \times \\ & \times \left[-1519 \left(\Delta / C_d L^2 d_{cp} \right)^3 + 622,96 \left(\Delta / C_d L^2 d_{cp} \right)^2 - 85,926 \Delta / C_d L^2 d_{cp} + 4,3384 \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Для учета мелководья, используя зависимость А. Д. Гофмана [10], формулу (20) можно переписать следующим образом:

$$\bar{D}_{МПМ} = \frac{3,688 \operatorname{tg}(\gamma/2) \Delta \left(50L d_{cp} + 1,12L^2 + 28B^2 \right) \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}}{d_{cp}^2 \gamma^{0,2465} \left(L^2 + 25B^2 \right) \left(1 + 0,1d_{cp}/h - 0,71(d_{cp}/h)^2 \right)} \times$$

$$\times \left[-1519 \cdot \left(\Delta / C_d L^2 d_{cp} \right)^3 + 622,96 \left(\Delta / C_d L^2 d_{cp} \right)^2 - 85,926 \Delta / C_d L^2 d_{cp} + 4,3384 \right], \quad (21)$$

где h — глубина моря.

Таким образом, формула (21) и приведённый рисунок представляют в своей совокупности математическую модель МПМ с пассивным фактором. Здесь необходимо заметить, что угол γ под знаком тангенса является не разностью курсов судов, а острым углом между линией курсов, который равен разности курсов только при их значении до 90° , и в других случаях — дополнением разности курсов до 180° .

Кроме того, из рисунка нетрудно вывести поправку за ширину судов $\Delta D_{МПМ_1}$ и их гидродинамическое взаимодействие при расхождении (*эффект присасывания*) $\Delta D_{МПМ_2}$. Для этого первоначально найдём $\angle OEC$, используя теорему синусов:

$$\frac{OC}{\sin \angle OEC} = \frac{OE}{\sin \gamma},$$

откуда с учётом (1) и (4) получим

$$\sin \angle OEC = v_1 \sin \gamma / \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1 v_2 \cos \gamma} = \sin \gamma / \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}. \quad (22)$$

Тогда для упрощения принимая, что значения ширины судов равны, получим

$$\Delta D_{МПМ_1} = B / \sin \angle OEC = B / \sin \gamma \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}. \quad (23)$$

Считается, что суда гарантированы от действия эффекта присасывания на встречном движении, если они расходятся на кратчайшей дистанции не меньше, чем три ширины меньшего из расходящихся судов. То же самое условие при обгоне в два раза строже [6]. Исходя из этого, для поправки $\Delta D_{МПМ_2}$ можно записать:

$$\Delta D_{МПМ_2} = \begin{cases} 6B / \sin \gamma \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma} & \text{при } \gamma < 90^\circ; \\ 3B / \sin \gamma \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma} & \text{при } \gamma \leq 90^\circ. \end{cases} \quad (24)$$

Объединяя (23) и (24), получим:

$$\Delta D_{МПМ} = \Delta D_{МПМ_1} + \Delta D_{МПМ_2} = \begin{cases} 7B / \sin \gamma \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma} & \text{при } \gamma < 90^\circ; \\ 4B / \sin \gamma \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma} & \text{при } \gamma \leq 90^\circ. \end{cases} \quad (25)$$

Во избежание представления (25) в виде системы, можно предложить следующую запись для поправки:

$$\begin{aligned} \Delta D_{МПМ} &= B(11 + 3 \cos \gamma / |\cos \gamma|) / 2 \sin \gamma \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma} = \\ &= B(11 |\cos \gamma| + 3 \cos \gamma) / |\sin 2\gamma| \sqrt{1 + (v_2/v_1)^2 - 2(v_2/v_1) \cos \gamma}. \end{aligned} \quad (26)$$

Недостаток формулы (26) заключается в невозможности определить поправку при $\gamma = 90^\circ$.

Таким образом, выполнено обоснование математической модели МПМ с пассивным фактором, представляющее собой комплекс формул, которые позволяют по элементам движения сходящихся на пересекающихся курсах судов и характеристикам данного судна с учетом глубины моря определить дистанцию МПМ, знание которой позволяет с учётом времени на принятие и исполнение конкретным судоводителем решения на маневр рассчитать время начала МПМ. В перспективе выражение (21) может быть скорректировано в большую сторону поправкой (коэффициентом) «на человеческий фактор». Подобное увеличение $D_{МПМ}$ позволит дать судоводителю с невысоким уровнем психологической устойчивости больше времени на принятие взвешенного адекватного решения и предупредить возможные ошибки при выборе траектории на расхождение. Предло-

женная математическая модель может быть использована в структуре системы поддержки принятия решения для предупредительной сигнализации судоводителю о необходимости предпринять МПМ.

Список литературы

1. *Ольшамовский С. Б.* Манёвр последнего момента / С. Б. Ольшамовский, А. И. Стеденикин, А. И. Кондратьев // Морской транспорт. — Серия: Безопасность мореплавания. — М.: Мортехинформреклама. — 2002. — Вып. 11 (402). — С. 1–31.
2. *Кондратьев А. И.* Оперативный выбор безопасных маневров последнего момента в судовых навигационно-информационных системах: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13, 05.22.19. — Новороссийск – СПб., 2002. — 113 с.
3. Момент последнего манёвра и чрезмерное сближение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://baltsudoservice.com/collision/moment-poslednego-manevra-i-chrezmernoe-sblizhenie.html>.
4. МППСС-72. Международные правила предупреждения столкновения судов в море, 1972 г. (англ./русский текст). — СПб.: ЦНИИМФ, 2010. — 128 с.
5. *Яскевич А. П.* Комментарии к МППСС-72: справочник / А. П. Яскевич, Ю. Г. Зурабов. — М.: Транспорт, 1990. — 479 с.
6. *Лушников Е. М.* Безопасность мореплавания и ведения промысла / Е. М. Лушников, В. О. Рамм. — М.: Колос, 1994. — 384 с.
7. *Мальцев А. С.* Маневрирование судов при расхождении / А. С. Мальцев. — Одесса: Морской тренажёрный центр, 2002. — 208 с.
8. *Демин С. И.* Приближенное аналитическое определение элементов циркуляции судна / С. И. Демин // ЦБНТИ ММФ: экспресс-информация. — Серия: Судовождение и связь. — 1983. — Вып. 7 (162). — С. 14–18.
9. *Знамеровский В. П.* Теоретические основы управления судном / В. П. Знамеровский. — Л.: Изд-во ЛВИМУ, 1974. — 275 с.
10. *Дёмин С. И.* Управление судном: учебник для вузов / С. И. Дёмин, Е. И. Жуков, Н. А. Кубачёв и др. / под ред. В. И. Снопкова. — М.: Транспорт, 1991. — 359 с.

УДК 621.396.932

А. Н. Маринич,
канд. техн. наук, доц.;

А. В. Припотнюк,
зав. лаб.;

Ю. М. Устинов,
д-р техн. наук, проф.

ЦИФРОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ В СУДОВЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ И СИСТЕМАХ СВЯЗИ

DIGITAL INFORMATION STREAMS IN THE SHIP INTEGRATED SYSTEMS OF NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS

На основании анализа интегрированных систем навигации и систем связи современного крупнотоннажного судна с неограниченным районом плавания рассматриваются виды цифровых информаци-

онных потоков. Показано, что информационные потоки на уровне терминалов систем связи и навигации осуществляются на относительно невысокой скорости в соответствующих стандартах. Приводятся примеры передачи текущих координат судна, пример передачи команд на перестройку аппаратуры связи и пример обмена информацией более высокого уровня с использованием компьютерной сети при связи в интегрированной системе навигации. Рассмотрен такой высокоскоростной поток информации, как обмен с использованием аппаратуры автоматической идентификационной системы. Показаны основные характеристики и виды данных при различных режимах работы аппаратуры. Отмечено, что еще большая скорость потоков информации наблюдается в системе спутниковой связи ИНМАРСАТ. Показаны особенности эксплуатации системы. При этом выделены проблемы использования ИНМАРСАТ в высоких широтах. Предлагается использование элементов стандарта европейской системы ASTERIX при высокоскоростном обмене в системах судовых сообщений в целях систем управления движением судов.

Based on the analysis of integrated navigation systems and communication systems modern heavy vessel with unlimited navigation area deals with the kinds of digital information flows. It is shown that the flow of information at the level of the terminal communication systems and navigation is carried out at a relatively low speed in the respective standards, are examples of the transmission of the current coordinates of the vessel and the sample transfer command to the restructuring of the communications equipment and example of exchange of information of a higher level with the use of computer networks for communication integrated navigation systems.

Considered such a high-speed flow of information exchange with the use of automatic identification system. The main characteristics and types of data at various operating modes of the equipment are shown. It is noted that else the high speed of flows of information is observed in satellite communication system INMARSAT. Features of operation of system are shown. Thus use problems INMARSAT in high latitudes are allocated. Use of elements of the standard of the European ASTERIX system at a high-speed exchange in systems of ship messages for the purposes of systems, vessel traffic management.

Ключевые слова: система связи и навигации судна, навигационный мостик, предложения интерфейса, магистральная шина, цифровая связь, дальняя связь, система судовых сообщений.

Key words: communication system and vessel navigation, navigation bridge, interface offers, trunk, digital communication, long-distance communication, ship reporting system.

ЦИФРОВЫЕ информационные потоки в судовых интегрированных системах навигации и системах связи обеспечивают автоматизацию функционирования систем и представление в требуемом виде выходной информации потребителям. Судовая интегрированная система навигации предназначена для определения навигационных параметров своего судна и окружающих целей, а система связи — для двусторонней связи между судном и абонентами. Состав интегрированной системы навигации зависит от валовой вместимости судна, а системы связи — от района плавания судна [1], [2]. На рис. 1 приведен состав интегрированной системы навигации для судов валовой вместимостью более 50000 рег. т, на рис. 2 — наиболее полный состав системы связи для судов международного плавания в морских районах А3 или А4 ГМССБ [3].

Для судов валовой вместимостью менее 50000 рег. т и с районами плавания А1 и А2 ГМССБ в состав входит меньшее число видов аппаратуры. На рис. 3 приведен внешний вид системы интегрированного навигационного мостика фирмы «FURUNO» [4], на рис. 4 — внешний вид системы связного мостика фирмы «SKANTI» для районов плавания А3 или А4.

Судовая интегрированная система навигации и связи обеспечивает выполнение ряда функций, связанных с обменом данными между устройствами в системе, близлежащими судами и удаленными береговыми центрами.

Рассмотрим каждую из этих функций обмена более подробно.

1. *Информационный обмен предложениями интерфейса между устройствами и терминалами судовой интегрированной системы навигации и связи.*

Обмен выходными параметрами между устройствами и терминалами судовых систем навигации и связи выполняется на основе Международного стандарта МЭК 61162-1, в котором приведены электрические схемы интерфейса и форматы предложений интерфейса для судового оборудования.

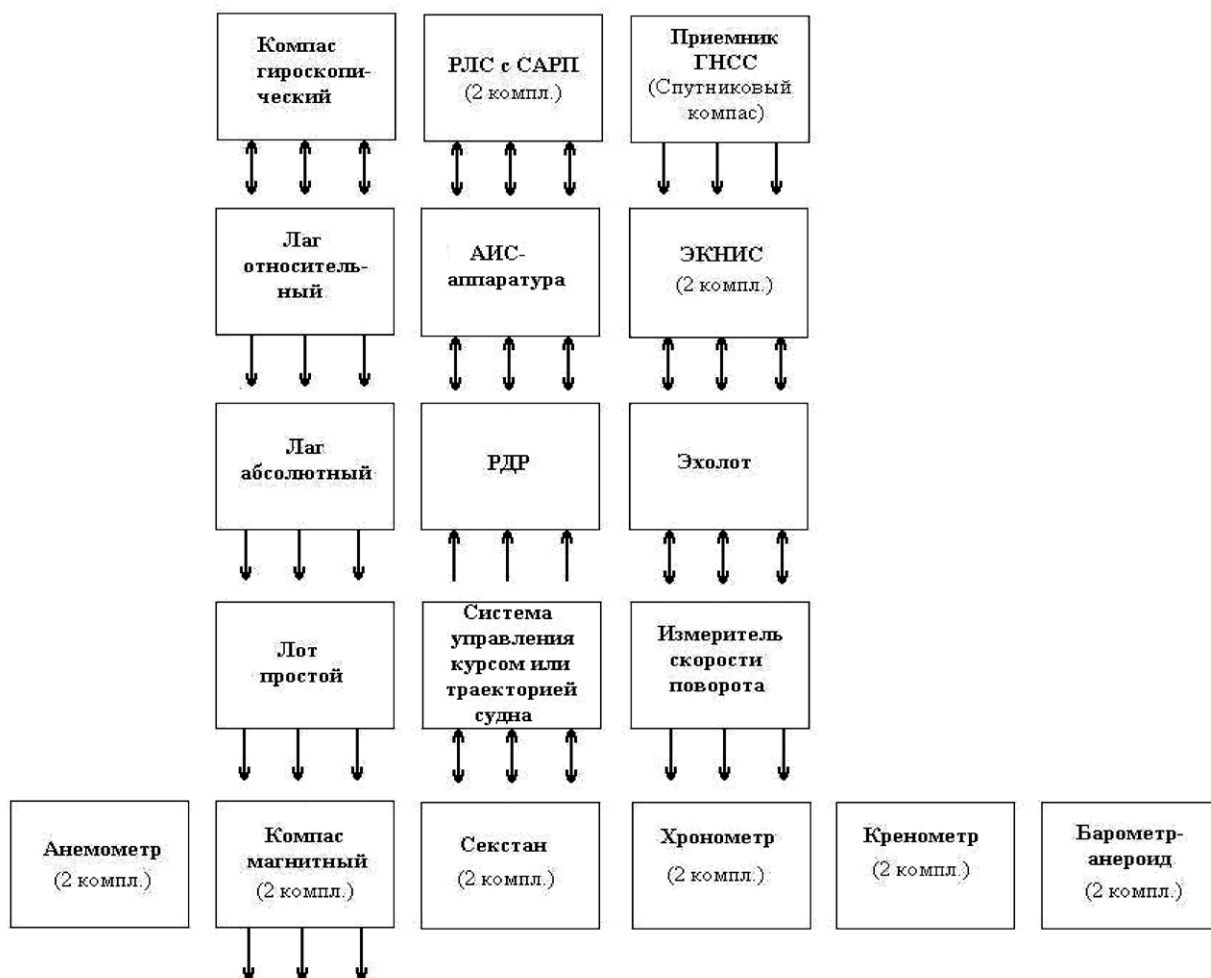


Рис. 1. Состав интегрированной системы навигации для судов валовой вместимостью более 50000 рег. т

Радиоборудование ГМССБ на судах международного плавания для морского района А3 или А4 (метод дублирования радиоборудования)

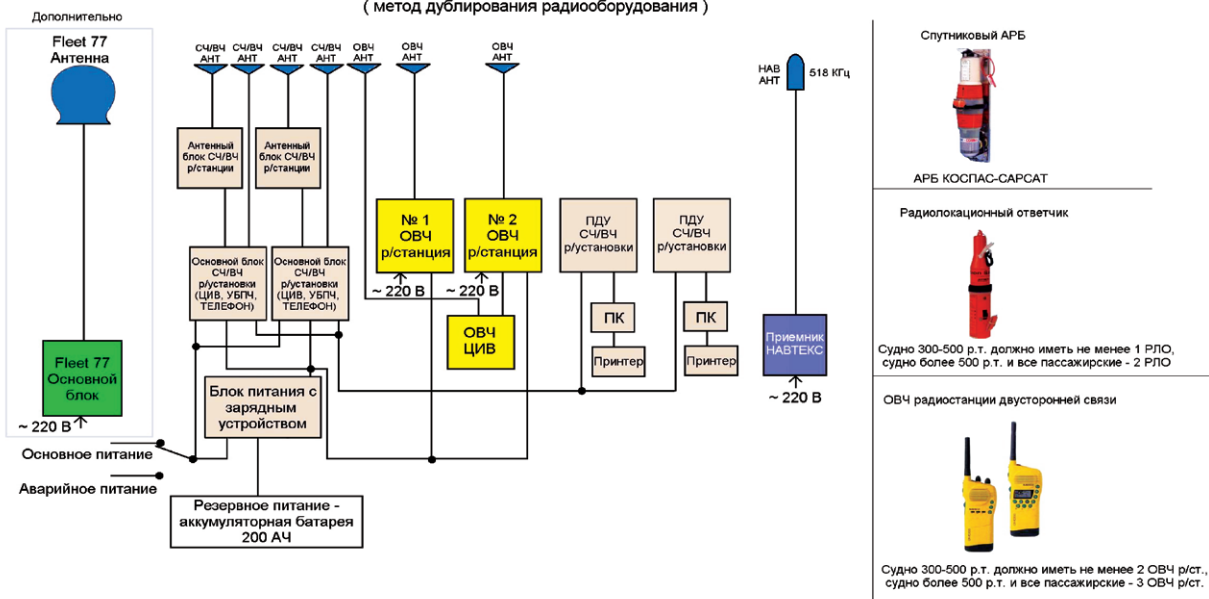


Рис. 2. Состав системы связи для судов в районах плавания А3 или А4 ГМССБ



Рис. 3. Внешний вид системы интегрированного навигационного мостика «VOYAGER (FURUNO)»



Рис. 4. Внешний вид системы связного мостика (SKANTI)

Приборы, устройства и терминалы могут служить как источниками, так и приемниками выходных параметров. Передача и прием предложений интерфейса производятся по электрическим линиям последовательным асинхронным кодом ASCII со скоростью 4800 бит/с. Ширина занимаемого спектра 4800 Гц. Символы представляют собой 8-битовые комбинации. Рассматривается возможность бескабельной связи (*fire-wire*).

В качестве примера на рис. 5 приведено предложение интерфейса формата GNS на выходе приемника ГНСС интегрированной системы навигации. Предложения интерфейса передаются по выбору с интервалами 20, 25, 50, 100, 200, 500 мс, 1 – 9 с [7].



Рис. 5. Предложение интерфейса формата GNS в судовой интегрированной системе навигации

На рис. 6 приведено предложение интерфейса формата FS1 на выходе и входе судовых радиостанций ОВЧ- и ВЧ-диапазонов системы связи в различных режимах работы.

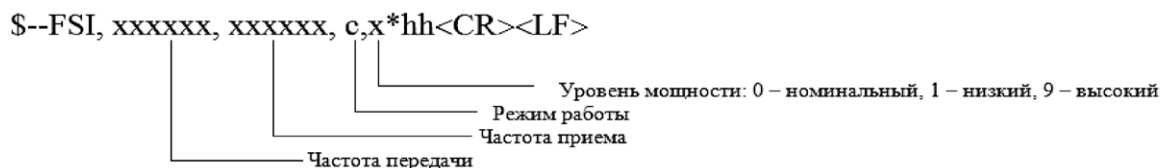


Рис. 6. Предложение интерфейса формата FS1 в судовой системе связи

На рис. 6 знакоместо, обозначенное буквой *c*, отводится для передачи режима работы, который передается в виде буквы или нуля:

- d* — F3E/G3E, симплекс, телефония;
- e* — F3E/G3E, дуплекс, телефония;
- m* — J3E, телефония;
- o* — H3E, телефония;
- q* — F1B/J2B FEC NBDP, телекс/телепринтер;
- s* — F1B/J2B ARQ NBDP, телекс/телепринтер;
- t* — F1B/J2B, только на прием, телепринтер/ЦИВ;
- W* — F1B/J2B, телепринтер/ЦИВ;
- X* — A1A код Морзе, режим записи (магнитофон);
- $\left\{ \begin{array}{l} \text{— A1A код Морзе, ключ/электронный ключ;} \\ \text{— F1C/F2C/F3C факсимильная связь;} \end{array} \right.$
- ноль — отсутствие информации.

Значение частоты при передаче и приеме (рис. 6) может передаваться в числовом виде, а также может передаваться информация о каналах связи и полосе частот. Для парных частот приема и передачи передаются нули.

Предложения интерфейса стандартизованы для всех видов и режимов работы судовой аппаратуры системы навигации и системы связи. С помощью предложений интерфейса в судовой интегрированной системе навигации передаются и принимаются выходные параметры отдельных устройств, а в системе связи обеспечивается настройка ОВЧ- и ВЧ-радиостанций и обмен информацией с абонентами с основного терминала оператора.

2. Информационный обмен показаниями индикаторов в судовой интегрированной системе навигации.

В судовой интегрированной системе навигации информационными индикаторами являются: индикатор РЛС с САРП, индикатор ЭКНИС, индикатор приемника ГНСС, индикатор эхолота, индикатор АИС-аппаратуры, многофункциональный индикатор.

В судовой интегрированной системе навигации устройства подключаются к магистральной шине CAN, обеспечивающей работу протокола, при котором навигационные данные устройств передаются по одному кабелю. Если сеть навигационных устройств расширяется, то дополнительные устройства подключаются к шине CAN. При работе с шиной CAN устройства работают, и каждому из них присваивается индивидуальный номер. На рис. 7 приведена сеть устройств, подключенных к шине CAN [4].

В сети CAN на любом информационном дисплее интегрированной системы навигации отображаются все интересующие оператора данные. На индикаторе ЭКНИС можно получить радиолокационное изображение РЛ- и АИС-целей, наложенное на электронную карту, или, наоборот, на индикаторе РЛС с САРП представить электронную карту с выхода индикатора ЭКНИС. На многофункциональном индикаторе можно получить в последовательно-параллельном режиме работы данные индикаторов ЭКНИС, РЛС, приемника ГНСС, эхолота, АИС-аппаратуры и др. Использование многофункционального индикатора позволяет сократить число индикаторов в интегрированной навигационной системе.



Рис. 7. Устройства судовой интегрированной системы навигации, подключенные к магистральной шине по протоколу CAN

3. Информационный обмен судовой системы связи с окружающими судами и базовыми станциями в диапазоне ОВЧ.

Обмен данными судовой АИС-аппаратуры с окружающими судами и с базовыми АИС-станциями производится по каналу ОВЧ-связи. С помощью АИС-аппаратуры цифровая связь осуществляется на международных частотах 161,975 и 162,025 МГц со скоростью 9600 бит/с. Метод модуляции сигналов — MSK (частотная модуляция с непрерывной фазой). Полоса занимаемых частот составляет 25 кГц или 12,5 кГц при разносе частот 4800 Гц или 2400 Гц. При приеме/передаче применяется код ASCII [5]. При работе АИС-аппаратуры в автономном и запросном режимах в сообщениях передаются судовые данные, указанные в табл. 1 [6].

Таблица 1

**Передаваемые судовые данные
по каналу АИС в различных режимах работы**

Автономный режим	Запросный режим
ММСИ-идентификатор Навигационный статус Координаты Скорость относительно грунта Путевой угол относительно грунта Истинный курс Время (UTC)	IMO-номер ММСИ-идентификатор Название Тип Размер: длина, ширина Навигационный статус Координаты Скорость относительно грунта Путевой угол относительно грунта Истинный курс Скорость и направление поворота Порт назначения Ориентировочное время прибытия Груз Осадка Время (UTC)

Обмен с судами с помощью АИС-аппаратуры класса А возможен и в режиме ЦИВ на 70-м канале (156,525 МГц), метод модуляции — G2B, скорость обмена — 1200 бит/с. Каждый символ кодируется 10 битами, полоса занимаемых частот — 10,2 кГц. Для связи с окружающими судами и базовыми станциями района А1 ГМССБ применяются ОВЧ-радиоустановки, входящие в состав судовой системы связи. ОВЧ-радиоустановки размещаются на всех судах независимо от района плавания. Для них выделена полоса частот 156...174 МГц. В этом диапазоне радиосвязь производится в режимах *телефония* (метод модуляции G3E) и *передача данных* с использованием ЦИВ на 70-м канале (метод модуляции G2B). Скорость цифрового обмена и полоса занимаемых частот для ОВЧ-радиоустановок та же, что и для АИС-аппаратуры при работе с использованием ЦИВ [6]. Увеличение скорости цифрового обмена возможно путем многочастотного излучения сигналов.

Дальность связи с помощью ОВЧ-радиоустановок зависит от высоты установки антенны над уровнем моря и режима работы. При выходной мощности передатчика 25 Вт и высоте установки антенны 9 м в режиме *телефония* дальность связи между судами составляет 10 ... 16 миль, между судном и базовой станцией на высоте 100 м — 27 миль. Дальность действия для ЦИВ возрастает примерно в 2 раза.

4. *Информационный обмен судовой системы связи с судами и береговыми центрами в СЧ/ВЧ-диапазонах и с помощью спутниковой системы ИНМАРСАТ.*

Цифровая связь в СЧ/ВЧ-диапазонах судовыми радиоустановками в режиме телеграфия ведется с использованием ЦИВ, УБПЧ (радиотелекс).

Для передачи сигналов бедствия и безопасности выделены следующие частоты:

— при ЦИВ: 2187,5; 4207,5; 6312,0; 8414,5; 12577,0; 16804,5 кГц;

— при УБПЧ (радиотелекс): 2174,5; 4177,5; 6268,0; 8376,5; 12520,0; 16695,0 кГц.

Для коммерческой радиосвязи при УБПЧ (радиотелекс) используются выделенные частоты в диапазоне (4202,5 ... 22443,5) кГц, при ЦИВ — выделенные частоты в диапазоне (455,5 ... 26122,0) кГц.

Работа в режиме *телеграфия* ЦИВ, УБПЧ (радиотелекс) ведется со скоростью 100 бит/с. Ширина занимаемого спектра — 300 Гц.

В СЧ-диапазоне дальность связи не превышает 500 км, в ВЧ-диапазоне дальность связи возможна на любых удалениях, однако при неправильном выборе рабочей частоты радиосвязь может быть неустойчивой или полностью отсутствовать. Выбор оптимальной рабочей частоты в ВЧ-диапазоне представляет наиболее сложную задачу при организации радиосвязи.

Учитывая нестабильность радиосвязи и малую скорость при телеграфии в ВЧ-диапазоне, в последнее время радиосвязь производится с помощью геостационарных спутников системы ИНМАРСАТ. Однако в морском районе А4 на широтах более 70 ° связь с помощью геостационарных спутников невозможна. Поэтому актуальной является задача модернизации судовых ВЧ-радиоустановок.

В настоящее время в России и за рубежом созданы перспективные образцы ВЧ-аппаратуры, обеспечивающие скорость передачи данных до 9600 бит/с в полосе 3 кГц. Решена задача перехода на цифровую обработку сигналов при однополосной телефонии и замена режима работы *телеграфия* на режим *передача данных* с использованием международного 8-битового кода ASCII [7], [10].

Для увеличения надежности передачи цифровых данных в перспективной аппаратуре используются адаптивные методы радиосвязи, многочастотные сигналы, корректирующие коды, новые виды модуляции, псевдослучайная перестройка рабочей частоты [9].

С учетом достигнутых результатов в последних резолюциях ИМО обсуждается необходимость модернизации судовой СЧ/ВЧ-аппаратуры.

5. *Информационный обмен судовой системы связи с береговыми центрами цифровыми данными в СЧ/ВЧ-диапазонах по Европейскому стандарту ASTERIX.*

В системе судовых сообщений (*Ship Reporting System*) определен перечень судовых данных при информационном обмене судна с береговыми центрами с определителями для разных видов передаваемой информации (табл. 2).

Таблица 2

**Обозначение и перечень судовых данных в системе судовых сообщений,
передаваемых с судна на берег**

№ п/п.	Условное обозначение определителя	Передаваемая информация
1	A	Идентификатор судна: ИМО-номер, MMSI-номер, позывной, название
2	B	Год, дата, время
3	C	Местоположение (в географических координатах)
4	D	Местоположение в полярных координатах относительно цели с известными координатами
5	E	Истинный курс
6	F	Скорость
7	G	Последний порт захода
8	H	Время входа в зону системы судовых сообщений
9	I	Порт назначения и предполагаемое время прибытия (ETA)
10	J	Наличие лоцмана на борту судна
11	K	Время выхода из зоны системы судовых сообщений
12	L	Предполагаемый путь следования
13	M	Береговые станции, с которыми устанавливается радиосвязь
14	N	Время передачи следующего сообщения
15	O	Осадка судна
16	P	Вид груза
17	Q	Краткое описание неисправности
18	R	Краткое описание типа загрязнения путем утерянных в море опасных грузов
19	S	Краткое описание погодных и морских условий
20	T	Другие данные агента или владельца судна
21	U	Размеры и тип судна
22	V	Медицинский персонал на борту судна
23	W	Число людей на борту судна
24	X	Краткое описание инцидента с данными других судов, вовлеченных в инцидент, оказания помощи и спасания
25	Y	Запрос на ретрансляцию переданного сообщения на другую систему судовых сообщений
26	Z	Окончание сообщения

Данные с судов передаются в береговые центры УДС, центры связи, главный морской спасательно-координационный центр, национальный центр мониторинга «Виктория», отраслевые центры мониторинга, информационные центры морских служб. Рассматривается необходимость создания интегрированного берегового центра, в котором методом зеркального отображения будет сосредоточена текущая информация от всех береговых центров [8].

Судовые данные для каждого определителя информации целесообразно передавать кодом ASCII по стандарту ASTERIX в блоках из нескольких байт (8-битовые пакеты). Стандарт ASTERIX разработан Европейским союзом и содержит 256 категорий, каждая из которых имеет различный набор сообщений. Для судов целесообразно использовать категорию 253.

Таким образом, цифровые информационные потоки в современных судовых интегрированных системах навигации и связи имеют различные уровни обмена, скорости и для унификации должны соответствовать международным стандартам. Для обмена информации между приборами должен использоваться стандарт МЭК 61162, однако в некоторых случаях для большого обмена визуальной, графической, радиолокационной, картографической и текстовой информации возможностей стандарта недостаточно. Применение сети Ethernet является решением проблемы. Поскольку специфика использования каналов радиосвязи накладывает свои ограничения, в этом случае возможно использование цифровых стандартных протоколов АИС, ИНМАРСАТ, ASTERIX. Однако увеличивающийся обмен данными требует поиска новых стандартов, протоколов и методов связи.

Список литературы

1. *Маринич А. Н.* Современное судовое оборудование средств электронной навигации, ГМССБ и береговая единая система контроля и управления судоходством: монография / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов [и др.] / под ред. Ю. М. Устинова. — Петропавловск-Камчатский: Камчат ГТУ, 2007. — 261 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. — Т. 1. — Ч. III. — СПб.: РМРС, 2015. — 534 с.
3. *Резников В. Ю.* Судовая радиосвязь: Справочник по организации и радиооборудованию ГМССБ / В. Ю. Резников, Ю. М. Устинов, А. А. Дуров [и др.] / под ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Судостроение, 2002. — 480 с.
4. Общий каталог продукции серии NavNet FURUNO, 2009. — 84 с.
5. *Маринич А. Н.* Автоматизированные системы мониторинга судоходства / А. Н. Маринич, Ю. М. Резников, Ю. М. Устинов, А. Р. Шигабутдинов / под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Судостроение, 2003. — 248 с.
6. *Маринич А. Н.* Судовая автоматическая идентификационная система / А. Н. Маринич, И. Г. Проценко, В. Ю. Резников, Ю. М. Устинов, А. Р. Шигабутдинов / под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю. М. Устинова. — СПб.: Судостроение, 2004. — 180 с.
7. Цифровые интерфейсы. 4.1. Один передатчик сообщений и несколько приемников. Стандарт МЭК 61612-1. Женева / Международная электротехническая комиссия. IEC 61162-1 (Fourth edition – 2010). Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital interfaces – Part 1: Single talker and multiple listeners, 2010. — 241 с.
8. *Кулинич А. И.* Повышение технико-экономических характеристик центров мониторинга судоходства / А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Спутниковые технологии и бизнес: спец. прил. журнала «Connect. Мир информационных технологий». — 2014. — С. 40–42.
9. *Маринич А. Н.* Обзор мобильных спутниковых телефонов для персональной связи на море // А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // CONNECT. Мир информационных технологий. — 2014. — № 12. — С. 76–79.
10. *Дуров А. А.* Целесообразность деления радиооборудования судов по назначению на три вида: средства навигации, средства связи и средства при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания / А. А. Дуров, В. С. Кан, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Эксплуатация морского транспорта 2009. — № 2. — С. 45–50.

УДК 556.53

В. И. Решняк,
д-р техн. наук, проф.;

А. И. Каляуш,
ст. преп.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АДСОРБЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩЕЙ ПОДСЛАНЕВОЙ ВОДЫ

INVESTIGATION WORK ADSORPTION FILTERS IN INSTALLATIONS FOR CLEANING OILY BILGE WATER

В статье приводятся результаты теоретического исследования особенностей работы адсорбционных фильтров, которые входят в состав оборудования для очистки нефтесодержащей подсланевой воды, образующейся при эксплуатации судов и их энергетических установок. Отмечается, что нефтесодержащая подсланевая вода может быть очищена в судовых установках или с помощью внесудовых технических средств, например, плавучих очистных станций, в состав которых как обязательный элемент входят адсорбционные фильтры, обеспечивающие удаление из нефтесодержащей подсланевой воды эмульгированных нефтепродуктов. Показано, что процесс адсорбции характеризуется выходной кривой, которая наиболее полно характеризует эффективность работы адсорбционных фильтров и позволяет рассчитать параметры конструкции фильтров. Предложена методика исследования работы адсорбционного фильтра, основанная на анализе свойств выходной кривой. Анализ свойств выходной кривой показывает ее симметричность. Это позволяет экспериментально определить выходную кривую и скорость ее перемещения при оптимизации количества проб.

The article presents the results of theoretical research of features of work adsorption filters, which are part of the equipment for cleaning oily bilge water generated during operation of ships and power plants. Oily bilge water can be purified in marine applications or using other technical means, for example, floating wastewater treatment stations. Adsorption filters ensure the removal of oily bilge water emulsified oils and are an essential element of these techniques of cleaning. It is shown that the adsorption process is characterized by an output curve that most closely characterizes the efficiency of the adsorption filter and allows to calculate the parameters of filter design. The proposed methodology for the study of adsorption based on the analysis of the properties of the output curve. The analysis of the properties of the output curve shows its symmetry. This allows an experimental determination of the output curve and the speed of its movement when optimizing the number of samples.

Ключевые слова: нефтесодержащая подсланевая вода, очистка, адсорбция, адсорбционный фильтр.
Key words: oily bilge water, cleaning, adsorption, adsorption filters.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ загрязнения водных объектов нефтепродуктами, которые содержатся в нефтесодержащей подсланевой воде остается актуальной проблемой эксплуатации судов. Как известно, решение этой проблемы может быть обеспечено путем очистки нефтесодержащей воды в судовых установках или с помощью внесудового очистного оборудования [1], [2]. Современные требования [3] к качеству очищенной воды могут быть обеспечены применением так называемых технологий глубокой очистки, которые включают способы очистки не только тех нефтепродуктов, которые содержатся в состоянии отдельной фазы (слоя или пленки), но и отэмульгированных нефтепродуктов. Такое требование к технологическим схемам очистки нефтесодержащей подсланевой воды определяется тем, что, во-первых, в нефтесодержащей подсланевой воде содержатся нефтепродукты в виде отдельного слоя (пленки) и в эмульгированном состоянии, во-вторых, тем, что обычно концентрация только эмульгированных нефтепродуктов превышает требуемую концентрацию нефтепродуктов в очищенной воде, иногда достаточно существенно. Из этого следует, что технология очистки должна включать способы очистки от нефтепродуктов, которые находятся в состоянии слоя (пленки), а также способы, которые обеспечивают

очистку от эмульгированных нефтепродуктов, поскольку, как известно, каждому виду загрязнения соответствуют свои способы очистки [4] и если не удалить из очищаемой воды эмульгированные нефтепродукты, то не будет обеспечена требуемая степень очистки воды.

В качестве способа очистки от пленочных нефтепродуктов в судовых установках и на плавучих очистных станциях применяется седиментация. Этот способ обладает рядом существенных преимуществ, одним из которых является то, что седиментационные устройства просты по конструкции и не содержат движущихся элементов. Очистка нефтесодержащей подсланевой воды от эмульгированных нефтепродуктов может быть обеспечена разными способами, но одним из основных является адсорбция. Адсорбция является достаточно традиционным, известным и широко используемым способом очистки. При правильно подобранном адсорбенте и правильно выбранных значениях технологических параметров процесса очистки адсорбция может обеспечить любую требуемую очистку воды от загрязняющих веществ. Для разных требований к степени очистки при всех прочих равных условиях проведения процесса очистки будет меняться только время достижения предельного значения концентрации загрязняющего вещества (в данном случае — эмульгированных нефтепродуктов), т. е. время работы загрузки фильтра. Но это время тоже можно регулировать, увеличивая, например, общую длину адсорбционного слоя. Адсорбционная способность адсорбционной загрузки при этом по ее длине будет меняться. Первыми будут «отрабатывать» первые участки адсорбционной загрузки. Максимальное использование загрузки при наличии нескольких адсорбционных фильтров можно обеспечить при последовательной ее замене в фильтрах и соответствующем изменении последовательности включения этих фильтров.

Адсорбция обеспечивает очистку от эмульгированных нефтепродуктов до принятых норм. Как правило, она осуществляется в адсорбционных фильтрах, которые являются достаточно простыми по конструкции устройствами. В адсорбционных фильтрах осуществляется очистка в так называемых *динамических условиях*, хотя известны попытки применения стационарных условий очистки нефтесодержащей подсланевой воды адсорбцией. Каждый из этих способов организации процесса очистки адсорбцией имеет свои достоинства и недостатки, анализ которых для каждого конкретного случая очистных устройств должен помочь сделать правильный выбор. Опыт применения судового очистного оборудования и внесудовых очистных сооружений (плавучих очистных станций) показывает, что в качестве устройств для очистки от эмульгированных нефтепродуктов применяются адсорбционные фильтры [5].

Эффективность работы фильтра зависит от трех основных факторов: адсорбента, скорости движения воды в адсорбционном слое (адсорбенте) и длины адсорбционного слоя. Поэтому основными параметрами работы фильтра с определенной адсорбционной загрузкой является его размеры (диаметр и высота) и подача очищаемой воды через фильтр. Диаметр и подача воды определяют скорость движения воды через фильтр, которая влияет на эффективность очистки воды и поэтому не должна превышать определенных значений. Как показано на рис. 1 а, чем меньше скорость движения воды через фильтр, тем больше время эффективной работы фильтра ($t_2 > t_1$), т. е. время, в течение которого концентрация нефтепродуктов не превышает требуемого значения ($C_{\text{вых}} < C_{\text{тр}}$).

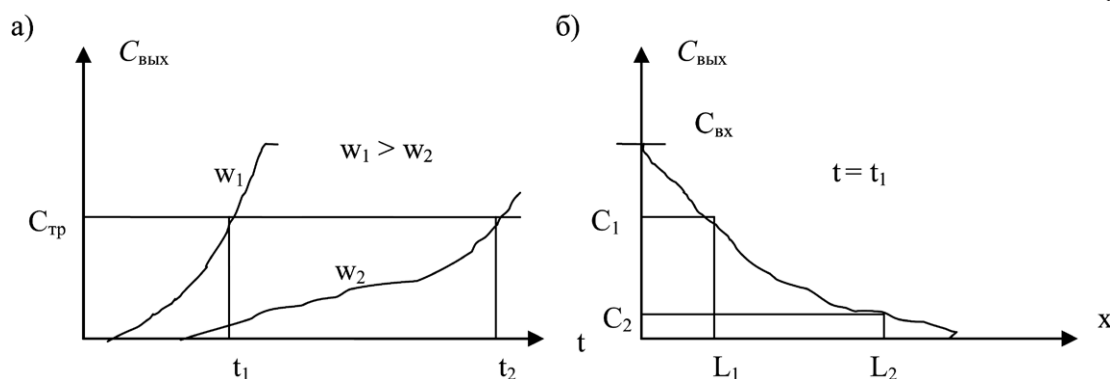


Рис. 1. Влияние скорости движения w воды в фильтре и длины x фильтра на эффективность очистки $C_{\text{вых}}$

Высота фильтра, точнее, адсорбционного слоя, который может быть размещен в нескольких последовательно подключенных фильтрах, также определяет время его эффективной работы. На рис. 1 б показано, как меняется концентрация нефтепродуктов в очищаемой воде по длине адсорбционного слоя в определенный момент времени ($t = t_1$) его работы. Чем больше высота фильтра (адсорбционного слоя) ($L_2 > L_1$), тем меньше концентрация ($C_2 < C_1$) нефтепродуктов в очищаемой воде.

При проектировании адсорбционных фильтров исчерпывающей информацией, позволяющей для заданных условий его работы, т.е. при известных значениях подачи Q очищаемой воды и требуемой степени очистки воды $C_{тр}$, определить параметры его конструкции D и H , а также время эффективной работы, является выходная кривая [4], [5].

Диаметр фильтра определяется в соответствии с формулами:

$$F = \frac{Q}{w}; \quad D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi w}},$$

где F — площадь сечения фильтра; Q — подача очищаемой воды.

Выходная кривая (рис. 2) показывает, как меняется концентрация нефтепродуктов в очищаемой воде в определенной точке адсорбционного слоя. Например, линия L_1 показывает изменение концентрации нефтепродуктов в точке L_1 .

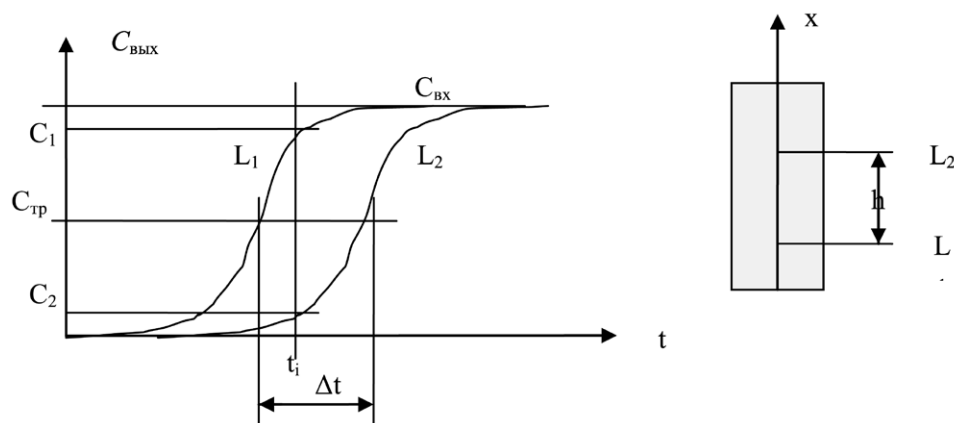


Рис. 2. Выходные кривые адсорбционного фильтра

Выходные кривые получают экспериментально. Анализ свойств выходной кривой позволяет предложить следующую организацию такого эксперимента, которая, с одной стороны, позволяет сократить количество отбираемых проб и объем работ, связанных с последующим их анализом, а с другой — не снижают точности экспериментального определения выходной кривой.

Анализ выходной кривой показывает следующие характерные ее особенности. Кривая имеет прямолинейный участок AB (рис. 3 а). Выходная кривая ограничена сверху значением $C_{вых} = C_{вх}$, так как концентрация нефтепродуктов на выходе исследуемого участка адсорбционного слоя не может быть больше концентрации на входе.

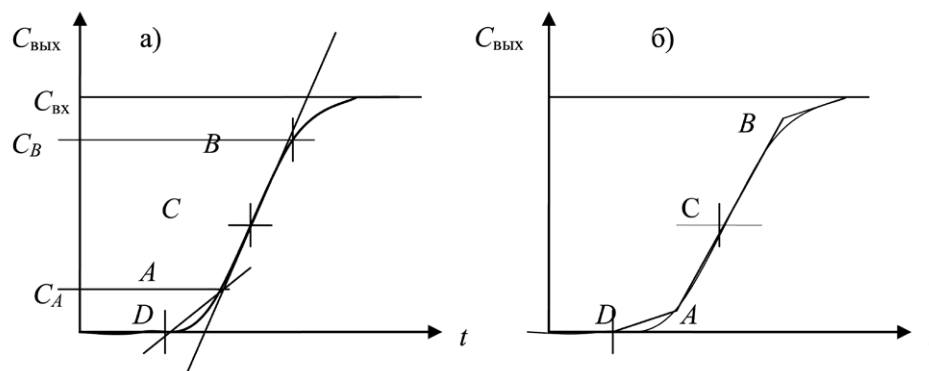


Рис. 3. Свойства выходной кривой

На выходной кривой можно выделить точку C , которая является некоторым центром симметрии выходной кривой. Концентрация нефтепродуктов в этой точке равна $0,5 C_{\text{вх}}$. Нетрудно видеть, что кривую линию, которая представляет собой выходную кривую, можно заменить ломаной линией. Как видно полученная ломаная линия (рис. 3 б) достаточно точно отражает выходную кривую. Это обстоятельство позволяет существенно снизить количество проб, которое должно быть отобрано для экспериментального определения выходной кривой. Для определения выходной кривой достаточно экспериментально определить точки A , B и D , через которые можно провести ломаную выходную линию адсорбционного фильтра.

Определение выходных кривых в двух сечениях фильтра, например, L_1 и L_2 (см. рис. 2), которые друг от друга находятся на расстоянии h , позволяют определить скорость движения выходной кривой

$$w = \frac{h}{\Delta t},$$

где Δt — время между наступлением одного значения концентрации, например, требуемой степени очистки $C_{\text{тр}}$ в указанных сечениях L_1 и L_2 фильтра.

Скорость движения выходной является важной технологической характеристикой и позволяет определить длину адсорбционного слоя при заданном желаемом времени работы фильтра или, наоборот, при выбранной длине адсорбционного слоя определить время работы фильтра. Длина адсорбционного слоя, в свою очередь, определяет высоту фильтра или нескольких фильтров.

Таким образом, предложенная методика экспериментального исследования работы адсорбционного фильтра позволяет с достаточной точностью и меньшим количеством проб выявить технологические характеристики фильтра, которые необходимы при проектировании очистной системы. Такие очистные системы могут быть применены для очистки подсланевой нефтесодержащей воды, например, в модульных комплексах, размещаемых как на плавучих, так и на береговых объектах, которые, в свою очередь, могут быть как стационарными, так и передвижными.

Список литературы

1. Решняк В. И. Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок: монография / В. И. Решняк. — СПб.: СПбГУВК, 2011. — 207 с.
2. Писарев А. О. Актуальные проблемы очистки судовых нефтесодержащих вод / А. О. Писарев, А. С. Курников // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2009. — № 27. — С. 97–108.
3. Наставление по предотвращению загрязнения внутренних водных путей при эксплуатации судов. — М., 2009.
4. Кульский Л. А. Основы химии и технологии воды / Л. А. Кульский. — Киев: Наукова думка, 1991.
5. Решняк В. И. Стратегия предотвращения загрязнения внутренних водных путей и моря при эксплуатации судов / В. И. Решняк, В. Е. Леонов // Сб. трудов межд. конф. «Современные и инновационные технологии». — Херсон, 2011. — С. 277–281.
6. Решняк В. И. Предотвращение загрязнения окружающей среды при эксплуатации судов : учеб. пособие / В. И. Решняк. — СПб.: СПбГУВК, 2008. — 24 с.
7. Решняк В. И. Исследование особенностей процесса окисления в дисперсной системе «вода – эмульгированные нефтепродукты» / В. И. Решняк, А. С. Курников, К. В. Решняк // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 3. — С. 171–177.
8. Мизгирев Д. С. Экспериментальные исследования современных судовых систем очистки сточных вод (СОСВ) / Д. С. Мизгирев, А. С. Курников, О. Л. Почкалов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 169–175.
9. Венцюлис Л. С. Основы охраны окружающей природной среды на водном транспорте: учеб. пособие / Л. С. Венцюлис. — СПб.: СПбГУВК, 2002. — 64 с.
10. Кучинская А. А. Технология очистки судовых нефтесодержащих вод с использованием природных сорбирующих материалов: дисс. ... канд. техн. наук. — Новороссийск, 2014.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 626/627.03.042.019.3

П. А. Гарибин,
д-р техн. наук, проф.;

М. В. Субботин,
асп.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВОЗНОГО ВОЛНОЗАЩИТНОГО СООРУЖЕНИЯ С КАМЕРОЙ ГАШЕНИЯ

EXPERIMENTAL RESEARCH OF OPEN PROTECTIVE STRUCTURE WITH STILLING BASIN

По результатам физического моделирования подтверждена работоспособность и определены оптимальные параметры конструкции сквозного оградительного сооружения с камерой гашения: проницаемость, ширина и отметка верха сооружения. Выполнено моделирование по критериям гравитационного подобия Фруда. Лабораторные исследования проводились в гидроволновом лотке экспериментальной базы НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ на специально разработанной модели сооружения. В результате опытов подобрана конструкция сооружения с отсутствием перелива через верх сооружения и ударного воздействия волн. В выбранном варианте конструкции волновое воздействие наиболее «сглажено» по сравнению с воздействием на другие модификации конструкции. Опытным путем определено, что наличие заполнения камнем и фигурными блоками в камере гашения сквозного оградительного сооружения не оказывает заметного влияния на волногасящие свойства сооружения.

According to the results of physical modeling was confirmed construction operability and defined optimal parameters of through protective structures with wave chamber — permeability, width, mark the top of the building. Modeling was carried according to the criteria of the gravitational Froude similarity. Experiments were carried out in the wave flume of the hydraulics laboratory of the SIC 26 CRI Ministry of Defence of the Russian Federation. As a result of experiments chosen design facilities without across the top of the overflow structures and the impact of the waves. In the chosen structure wave effect is «smoothed» as compared with the effect on other design modifications. Empirically determined that the presence of the filling stone and figure blocks in the wave chamber of the protective structure does not appreciable effect on the wave properties of the structures.

Ключевые слова: оградительное сооружение, гашение энергии волн, критерии моделирования, гидроволновой лоток, камера гашения, проницаемость.

Key words: protective structure, wave protective structure, breakwaters, energy dissipation of waves, criteria for modeling, wave flume, wave chamber, permeability.

Введение

Целью данного исследования является определение рациональной конструкции оградительного сооружения сквозного типа с камерой гашения. Ввиду сложности протекающих процессов взаимодействия волн с сооружением, получение достоверных теоретических результатов связано со значительными трудностями, поэтому для определения физики явлений был выбран экспериментальный путь исследований. Экспериментальному исследованию конструкций сквозных волнозащитных сооружений посвящено много трудов как отечественных специалистов: [1] – [3], и др., так и зарубежных [14]. Для некоторых видов конструкций проницаемых сооружений составлены нормативные документы с рекомендациями по расчету и конструированию [15]. В данной работе проведены исследования для нового типа оградительного сооружения, разработанного и предложенного специалистами ООО «Морстройтехнология» [4], применяемого при определенных условиях проектирования [5], [6].

Основная часть

Для лабораторного изучения условий обеспечения устойчивости оградительного сооружения и определения эффективности гашения энергии волн необходимо соблюдение законов механического подобия: геометрического, кинематического и динамического, а также соблюдение одинаковых граничных и начальных условий.

Так как лабораторные исследования проводились с одинаковой, как и на натуре, жидкостью и на мало отличающихся высотных отметках, то полагалось правомерным выполнение известных условий [7]:

$$\rho = \text{idem}, \quad g = \text{idem}, \quad V = \text{idem}, \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; g — ускорение силы тяжести, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$; V — орбитальная скорость на поверхности волны, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Исследуемое оградительное сооружение принималось абсолютно жестким. В данном случае имеет место частичное или неполное подобие явлений. Выбор определяющего критерия был произведен исходя из физики процесса. Основная часть возмущающих и восстанавливающих сил, действующих на рассматриваемую систему, является объемной, изменяющейся пропорционально кубу линейного масштабного коэффициента. Следовательно, должно быть соблюдено условие

$$\text{Fr} = \frac{V^2}{gl} = \text{idem}, \quad (2)$$

где Fr — число Фруда; l — характерный линейный размер, м.

Как известно, играющие большую роль инерционные силы совместимы с любыми критериями подобия. При волновом воздействии на сооружение возникают обусловленные вязкостью жидкости силы: сопротивление, трение, формы и волновое. Из теоретических проработок [8] и [9] известно, что силы трения от сопротивления движению жидкости, зависящие от числа Рейнольдса (Re), незначительны.

При истечении жидкости через отверстия или щели в проницаемых стенках автотельность, согласно работе [2], по числу Рейнольдса будет выполняться, если процесс протекает в квадратичной области сопротивления, т. е.

$$\text{Re} = \frac{V_m \cdot l_m}{\nu} \geq 100, \quad (3)$$

где V_m — характерная скорость на модели, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; l_m — характерный линейный размер, м; ν — кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Моделирование взаимодействия волн с проницаемой наброской будет независимым от числа Рейнольдса, если выполняется условие

$$\text{Re} = \frac{V_m \cdot D_m}{\nu} \geq 1000, \quad (4)$$

где D_m — крупность элементов наброски.

Для данного процесса силы трения $R_{\text{тр}}$, зависящие от Re , не оказывают существенного влияния на характер исследуемого явления.

Критерий подобия сил, обусловленных поверхностным натяжением, известный как критерий Вебера (We), может быть получен из следующего выражения:

$$\text{We} = \frac{\Delta p_0 \cdot L}{\rho V^2 L} = \frac{\sigma}{\rho V^2 L}, \quad (5)$$

где Δp_0 — приращение давления; Па; σ — поверхностное натяжение, Па.

Учитывая рекомендации [2], в экспериментальных исследованиях силами поверхностного натяжения, по сравнению с объемными, можно пренебречь (в этом случае критерий Вебера будет совместим с критерием Фруда) при выполнении следующих условий: высота волн на мо-

дели должна быть более 2 – 2,5 см, а их длина более 20 – 25 см. Для выполнения данных условий при заданных исходных данных в дальнейшем был подобран масштаб экспериментальных исследований.

На основании ранее изложенного и учитывая методику, предложенную [3], за определяющий критерий при моделировании был принят критерий Фруда: $Fr = idem$.

Для пересчета лабораторных данных в натурные использовались следующие масштабные коэффициенты:

$$\alpha_l = l_m : l_n \text{ — линейный масштаб (1:38);}$$

$$m_n = m_m \alpha_l^3 \text{ — масса элемента;}$$

$$h_n = h_m \alpha_l \text{ — высота волны;}$$

$$\lambda_n = \lambda_m \alpha_l \text{ — длина волны;}$$

$$d_n = d_m \alpha_l \text{ — глубина у сооружения;}$$

$$p_n = p_m \alpha_l \text{ — давление от волны;}$$

$$Q_n = Q_m \alpha_l^3 \text{ — нагрузка от волны;}$$

$$T_n = T_m \alpha_l^{\frac{1}{2}} \text{ — период волны;}$$

$$V_n = V_m \alpha_l^{\frac{1}{2}} \text{ — скорость волны.}$$

Экспериментальные исследования по определению воздействий волн на модель мола сквозной конструкции выполнялись в гидроволновом лотке (рис. 1), оснащённом волнопродуктором типа балки «ныряло» [10].

Для проведения эксперимента были приняты следующие исходные данные:

длина, м	38
ширина, м	0,7
высота, м	1,2
минимальный рабочий уровень воды, см	25
максимальный рабочий уровень воды, см	90
волнопродуктор регулярных волн, шт.	1
мощность привода волнопродуктора, кВт	1 – 3
период продуцируемых волн, с	0,4 – 2,6
высота продуцируемых волн, см	до 30
максимальная скорость течения, см/с	до 120



Рис. 1. Гидроволновой лоток

Исходя из условий моделирования, размеров волнового лотка и технических характеристик волнопродуктора максимально возможный масштаб моделирования принят равным 1:38 по отношению к натуре.

Параметры волн на модели фиксировались емкостными волномерами. Коэффициент отражения k_{ref} в зависимости от экспериментальных данных определялся по формулам:

$$k_{ref} = \frac{h_{пуч} - h_{yz}}{h_{пуч} + h_{yz}}; \quad h_{ref} = h_0 \cdot k_{ref}, \quad (6)$$

где $h_{\text{пуч}}$ — высота в пучности интерферирующей волны; $h_{\text{уз}}$ — высота в узле интерферирующей волны; h_{ref} — высота отраженной волны.

Согласно полученным экспериментальным путем значениям высоты h_{ref} , расчетным способом вычислялись значения волнового давления от воздействия интерферирующих волн, а также определялась устойчивость каменных постелей и защитных креплений дна.

Для определения волновых давлений в шпунтовых стенках моделей и в ростверке были установлены датчики давления. Наличие перелива и всплесков волн, устойчивость камня защитного крепления дна определялись визуально с обязательным фиксированием видео- и фотосъемкой. При испытаниях моделей каждый опыт повторялся не менее трех раз.

На подготовительном этапе исследований подбирались исходные параметры волн в экспериментальной установке путем изменения периода и амплитуды балки волнопродуктора, а также калибровки модельных параметров (табл. 1).

Таблица 1

**Принятые исходные параметры волн
при моделировании конструкций**

№ п/п.	Высота волны, м		Период волны, с		Длина волны, м		Эксцентрик e , мм
	натура*	модель	натура*	модель	натура*	модель	
1	6,2	0,163	9,0	1,46	100	0,263	129
2	6,8	0,179					154
3	7,5	0,197					183
4	6,1	0,160	9,44	1,53	115	0,300	133
5	6,7	0,176					149
6	7,4	0,195					168
7	7,5	0,197	10,17	1,65	140	0,368	153
8	8,4	0,221					173
9	9,2	0,242					191

* — параметры волн приняты по результатам [10], [11].

Оградительное сооружение включает ряд свай 1 со стороны фронта волны. Со стороны защищаемого объекта — акватории 2 морского порта, расположен ряд свай 3, которые объединены в глухую стену. Между рядами свай 1 и 3 установлен промежуточный ряд свай 4. Все сваи сооружения объединены в верхней части ростверком 5. Сваи заглублены в основание — дно акватории 6. Сваи 3 соединены между собой посредством шпунтовых замков 7. Все сваи имеют одинаковую высоту и представляют собой металлические трубы. Схема конструкции мола приведена на рис. 2 [5].

Для выполнения исследований предложена конструкция мола с тремя рядами свай, ростверком без парапета и тыловой шпунтовой стенкой. Дополнительно к этой модели предложены семь её модификаций, отличающихся наличием в первой секции моделей наброски из камня, тетраподов и гексабитов либо изменениями сквозности между сваями первого и второго ряда за счет увеличения диаметра свай или их шага во втором ряду. Схема предложенной к моделированию конструкции мола приведена на рис. 2.

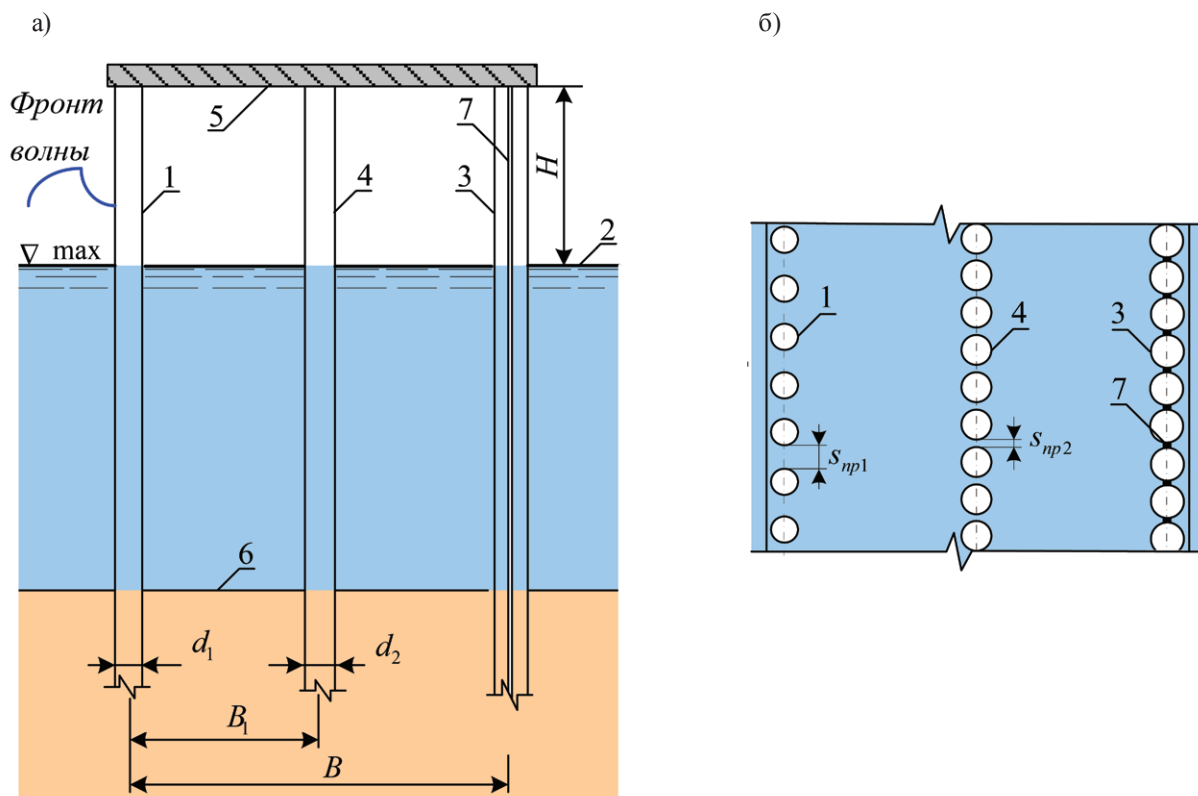


Рис. 2. Принципиальная схема нового типа ОС: а — вид сбоку; б — план

Условные обозначения:

H — превышение ростверка относительно максимального уровня воды на акватории;
 d_1, d_2 — наружный диаметр первого и второго ряда свай соответственно;
 S_{np1}, S_{np2} — продольная проницаемость (отношение площади отверстий к общей площади фронтальной поверхности) первого и второго ряда свай соответственно

Состав всех опытов, которые были проведены при моделировании, указан в сводной табл. 2.

Таблица 2

Сводная таблица состава выполненных опытов

Вариант модели	Описание вариантов моделей, принятых для исследований конструкций мола
1	Проектная конструкция мола с тремя рядами свай $\varnothing 1020$ мм, тыловой шпунтовой стенкой и ростверком без парапета
2	То же, что и вариант 1, с модернизацией: без парапета с тыловой шпунтовой стенкой, средний ряд свай $\varnothing 1220$ мм с шагом 2 м, остальные $\varnothing 1020$ мм с шагом 2 м, мористая секция засыпана до $\downarrow -7,5$ м камнем 3 – 7 т
3	То же, что и вариант 2, с модернизацией: без парапета, с тыловой шпунтовой стенкой, средний ряд свай 1220 мм $\varnothing$ с шагом 2 м; 1-я секции заполнена до $\downarrow \pm 0,0$ камнем 3 – 7 т
4	То же, что и вариант 3, с модернизацией: камень 3 – 7 т до $\downarrow \pm 0,0$, а выше тетраподы Т-10 до $\downarrow +5,5$ м
5	То же, что и вариант 4, с модернизацией: камень 3 – 7 т до $\downarrow -5$ м, а сверху до $\downarrow \pm 0,0$ наброска гексабитов 20 т
6	Без засыпки камня, без парапета, средний ряд свай $\varnothing 1220$ мм с шагом 2 м, наличие тыловой шпунтовой стенки; остальные ряды свай $\varnothing 1020$ мм с шагом 2 м
7	То же, что и вариант 6 со средним рядом свай $\varnothing 1220$ мм с шагом 1,5 м, парапета нет, остальное без изменений
8	Наброска камня отсутствует; парапета нет, наличие тыловой шпунтовой стенки; 1-й ряд свай $\varnothing 1220$ мм с шагом 2 м, 2-й ряд свай $\varnothing 1220$ мм с шагом 1,5 м, 3-й ряд свай $\varnothing 1020$ мм с шагом 2 м

В табл. 3 приведены результаты моделирования предложенных модификаций конструкции оградительных сооружений.

Таблица 3

Сводная таблица результатов выполненных опытов

Вариант модели	Результаты опыта	Выводы по вариантам
1	Перелива и всплесков у мористой стороны нет. Наблюдается удар волны в верхнюю часть шпунтовой стенки и в тыловую часть низа ростверка. Имеет место отражение волны от тыловой стенки с отбросом ее в сторону 2-го ряда свай с возможным ударом брызг в низ ростверка и у этого ряда. Наблюдается размыв грунта у 1- и 3-го рядов свай. Проход волны у 1-го ряда свай свободен, без брызг и всплесков	При высоте исходных волн до 7,5 м конструкция мола, по-видимому, будет работоспособной, если пренебречь ударами волн о низ ростверка. При высоте исходных волн до 7,5 м конструкция мола, по-видимому, будет работоспособной, если пренебречь ударами волн о низ ростверка. При высоте исходных волн до 7,5 м конструкция мола, по-видимому, будет работоспособной, если пренебречь ударами волн о низ ростверка.
2	Перелива и всплесков не наблюдалось. Первоначально удар волн наблюдался в 1-й ряд свай, а затем переместился во вторую половину мола с отражением от шпунтовой стенки в виде отброса волны. Общий характер воздействия волн со шпунтовой стенкой несколько сгладился по сравнению с вариантом 1, при тех же параметрах волн	Заметных улучшений эффективности работы конструкции не выявлено
3	Перелива через ростверк нет; всплески и отбросы волн от ростверка наблюдаются при подходе гребня волны к мористой стороне модели. Появился сильный удар волн о 1-й ряд свай и удары волн в 1-ю половину мола вплоть до 3-го ряда свай; при дальнейшем продвижении волны наблюдается сильный удар в низ ростверка у 3-го ряда свай. Наблюдаются колебания камня в верхнем слое его наброски	Характер воздействия волн ухудшился по сравнению с воздействием волн на модель по варианту 2. За наброской камня во второй секции мола отмечается повышение уровня воды, как и в случае подводного волнолома, что вызывает ухудшение взаимодействия волн (удары о низ ростверка) с данной конструкцией
4	Перелива через парапет ростверка не наблюдалось (при отсутствии парапета перелив через ростверк был зафиксирован). Наблюдался удар волны о низ ростверка на участке 1-го ряда свай. Всплеск и отброс волн от парапета имел место. Во 2-й половине модели ударов не было, что зафиксировано на фото рис. 5.12 а; при откате волны уровень воды во 2-й секции наблюдался выше, чем у мористой стороны модели. Тетраподы и камень были устойчивы	При воздействии исходных волн высотой не выше 7,5 м конструкция работоспособна. При воздействии волн с высотами более 7,5 м исследования не проводились
5	Перелива волн через ростверк не наблюдалось. Всплеск волны небольшой. Имеют место удары волн о низ ростверка на участке 1-го ряда свай, а затем у 3-го ряда свай, причем удара у 2-го ряда нет; есть брызги от волны, отраженной от тыловой стенки. Характер возможного размыва дна под сооружением при отсутствии защитного крепления	Результаты опытов близки к результатам опытов по варианту 3

Таблица 3
(Окончание)

6	Перелива волн во всех опытах не наблюдалось; всплески волн у мористой стороны модели отсутствовали. Наблюдались удары волн о низ ростверка на участке 3-го ряда свай и у шпунтовой стенки, у датчика давления Д-1 давление носило импульсный характер, при $h = 7,5$ м значения давления в датчике Д-4 измерены примерно равными 45 – 80 кПа, а в Д-3 — равными 55 – 62 кПа. При высотах волн $h = 7,5$ м отраженная от шпунтовой стенки волна создавала также импульсное давление о низ ростверка на участке 2-го ряда свай. При других параметрах волн $h = 8,4 - 9,2$ м воздействие волн на низ ростверка происходит наиболее бурно и динамично (см. рис. 5.16 и 5.17), волновые давления зафиксированы при $h = 9,2$ м в датчике Д-4 порядка 130 кПа, а в Д-3 — около 100 кПа; при $h = 9,2$ м шпунтовая стенка (из бакелита) изгибалась под ударами волн	Анализ этой конструкции показывает, что принятой пористости рядов свай недостаточно, требуется либо дополнительное волногашение, либо снижение пористости рядов свай
7	Перелива волн через ростверк не наблюдалось. Ударов волн о низ ростверка не наблюдалось при исследованных значениях высот волн и периодах. Вариант мола при $h \leq 7,5$ м вполне работоспособен. Коэффициент $\bar{k}_{ref} = 0,52$ при $h = 6,1$ м и уменьшается до 0,38 при увеличении высоты волны до $h = 7,5$ м. Имеет место прохождение волны сквозь 2-й ряд свай в виде водо-воздушной смеси. Отраженная волна от 2-го ряда свай проходит к 1-му ряду и через него в мористую акваторию, при этом коэффициент отражения волн (в целом от сооружения) уменьшается от значения $\bar{k}_{ref} = 0,44$ (при $h = 7,5$ м) до 0,37 (при $h = 9,2$ м)	При $h \leq 7,5$ м сооружение работоспособно, переливов и ударов нет. При $7,5 < h \leq 9,20$ на модели возникают небольшие удары волн во 2- и 3-й ряды свай. При некотором допущении о возможности незначительного воздействия волн о низ ростверка, исследованная модель может рассматриваться при проектировании в качестве рекомендованной
8	Перелива через верх ростверка не было, ударного воздействия волн о низ ростверка не наблюдалось. У 2-го ряда свай вблизи датчика Д-4 имел место подъем волны в виде факела брызг до низа ростверка, однако давления датчик не зафиксировал (даже при $h = 7,5$ м). Взаимодействие волн с молом оценивается позитивно. Наблюдается локальный подъем уровня воды у 1- и 2-го рядов свай, между которыми образуется впадина. При воздействии волны с $h = 7,4$ м наблюдается отражение в виде отброса волн от 1-го ряда свай, причем волна, проходящая через 1-й ряд свай, отражается от 2-го ряда и частично проходит во 2-ю секцию мола. В процессе проведения опытов отражение волн наблюдалось от мористой стороны мола и от 2-го ряда свай. Отражение от 1-го ряда свай происходит в виде незначительных всплесков (при $h = 7,5$ м) и относительно существенных.	Конструкция работоспособна к воздействию волн всех расчетных параметров. Конструкция удовлетворяет требованиям с тем, чтобы она не вызывала переливов волн и ударного воздействия их о низ ростверка, а также, чтобы силовые воздействия волн на шпунтовую стенку находились в пределах допустимых значений по устойчивости

При теоретической постановке экспериментов была решена важная задача критериальной оценки и допущений для физического моделирования, а также разработана специальная методика эксперимента, обеспечивающая релевантность данных. По результатам исследований был получен патент на полезную модель [4].

Следует отметить, что на сегодняшний день нет нормативной базы для расчета предложенной конструкции оградительного сооружения. Для успешной реализации конструкции (проектирования) проведены экспериментальные исследования оградительного сооружения при условии волнового воздействия на него. Особенность эксперимента состояла в том, что были проведены работы по теоретической подготовке по вопросам методов и параметров моделирования. На основании теоретических предпосылок, допущений, а также методики эксперимента и его результатов возможно проектирование и дальнейшее строительство оградительных сооружений.

Выводы

1. Выбор типа внешних оградительных сооружений должен выполняться на основе экспериментальных исследований при проведении физического моделирования.

2. Как показали результаты экспериментов, во всех восьми вариантах конструкции мола переливов волн через верх ростверка не наблюдалось. Однако ударные воздействия волн у многих из них имели место.

3. Наличие заполнения камнем и фигурных блоков в камере гашения сквозного оградительного сооружения не оказывает заметного влияния на волногасящие свойства сооружения.

Работоспособность конструкции подтверждена физическим моделированием в лотке НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ в 2009 г. [10].

Список литературы

1. Михалев М. А. Физическое моделирование гидравлических явлений / М. А. Михалев. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. — 443 с.
2. Кожевников М. П. Гидравлика ветровых волн / М. П. Кожевников. — М.: Энергия, 1972. — 264 с.
3. Чугаев Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. — Л.: Энергия, 1982. — 672 с.
4. Пат. 103367 РФ, МПК E02B 3/06 (2006.01). Волнозащитное сооружение / М. Ю. Николаевский, Р. Ю. Горгуца, М. В. Субботин. — № 2010146509/21; заявлено 15.11.2010; опублик. 10.04.2011 // Бюл. № 10. — 3 с.
5. Гарибин П. А. Сквозное волнозащитное сооружение с камерой гашения / П. А. Гарибин, М. В. Субботин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2(24). — С. 74–82.
6. Николаевский М. Ю. Сквозное непроницаемое волнозащитное сооружение с камерой гашения в порту Сочи / М. Ю. Николаевский, Р. Ю. Горгуца, М. В. Субботин // Гидротехника XXI век. — 2013. — № 2 (14). — С. 34–39.
7. Гарибин П. А. Воднотранспортное использование малых водотоков: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.07. — СПб., 2003. — 302 с.
8. Патрашев А. Н. Прикладная гидромеханика. / А.Н. Патрашев. — М., 1970.
9. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. — М., 1977. — 440 с.
10. НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ. Физическое моделирование воздействия ветровых волн на мол, проектируемый в порту Сочи: отчет о НИР. — СПб., 2009. — 139 с.
11. Математическое и гидравлическое моделирование для разработки проекта первого грузового района в районе устья р. Мзымта, г. Сочи, Краснодарского края: отчет о НИР / ОАО ЦНИИС, филиал ОАО ЦНИИС «НИЦ Морские берега». — Сочи, 2008.
12. Математическое моделирование волнового режима и динамики берега в районе проектируемого порта в Имеретинской низменности Адлерского р-на г. Сочи с разработкой рекомендаций по конструкции и конфигурации оградительных сооружений и берегозащите прилегающих участков побережья: отчет о НИР / ООО «Морстройтехнология». — СПб., 2008.

13. Гидрометеорологические условия Азовского и Черного побережий Краснодарского края, ГОИН: отчет о НИР. — М., 1996.

14. M. Sc. Hany Goma Ibrahim Ahmed Wave Interaction with Vertical Slotted Walls as a Permeable Breakwater / Dissertation. — Wuppertal, 2011.

15. ВСП 33-03-07 Инструкция по проектированию откосных и сквозных оградительных сооружений и специальных подводных стендов. — М.: МО РФ, 2008.

УДК: 656; 004.8, 007.5, 51-7, 510.67

С. А. Селиверстов,
науч. сотр.;

Я. А. Селиверстов,
науч. сотр.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ МЕГАПОЛИСА С ВВОДОМ НОВЫХ ВИДОВ ВОДНОГО ВНУТРИГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

MODELING OF TRAFFIC FLOWS MEGAPOLIS WITH INTRODUCTION OF NEW WATER TYPES OF PASSENGER TRANSPORT INTERACITY

Обоснована актуальность развития внутригородских транспортных процессов и создание объектов транспортной инфраструктуры, ускоряющих внедрение и использование новых видов транспорта. Проведено исследование математических методов анализа транспортных потоков. Осуществлен переход от поведенческих принципов Вардроп к целевой функции управления процессами мобильности, базирующейся на целевых ориентирах пользователя и целевых ориентирах городской транспортной системы. Применительно к аппаратно-программному обеспечению транспортного планирования рассмотрена трилинейная модель EVA. Развитие новых видов транспорта рассмотрено на примере ввода «Приморской линии» внутреннего водного пассажирского транспорта г. Санкт-Петербурга. Осуществляется разработка информационно-логической модели, выполняются моделирование и оценка процессов перераспределения транспортных потоков на участке городской транспортной сети, даны рекомендации по транспортному обслуживанию, прилагающейся к «Приморской линии» районов.

Justification of the relevance of intracity transport processes and the creation of transport infrastructure accelerating the use of new modes of transport. Analyzed of the mathematical methods development for analyzing traffic flows. The transition from the behavioral principles J. Wardrop to target management processes of mobility, based on the user's targets and targets the urban transport system. Relation to hardware and software for transport planning considered trilinear model EVA. Development of new transport modes accelerating intercity transport processes considered as an example of input «Primorskaya line» inland waterway passenger transport in St. Petersburg, developed information and logical, modeled and evaluated redistribution of traffic flows in the area of urban transport network. Based on the simulation results are given recommendations on transport services of the area, adjacent to the «Primorskaya line».

Ключевые слова: городская транспортная система, внутренний водный пассажирский транспорт, транспортное моделирование, методы оценки эффективности транспортных коммуникаций, прогнозирование транспортных потоков, матрицы корреспонденций, энтропийная модель, трилинейная модель, модель EVA.

Key words: megalopolis transport system, inland water passenger transport, transport modeling, efficiency evaluation methods of transport communications, forecasting of transport traffic, matrixes of correspondence, entropy model, trilinear model, EVA model.

Введение

Развитие структуры и скорости изменения социально-экономических процессов в мегаполисах [1], таких как рост городского населения, повышение качества жизни и личного дохода стали причиной стремительного увеличения общего числа пассажирских транспортных средств (ТрС) на городской транспортной сети (ГТс) и их разнообразия, что положительно отразилось на повышении качества индивидуальных перевозок. Схожие процессы затронули сектор городского жилищного, коммерческого и иного инфраструктурного строительства и скорости внутригородского товарооборота, с одной стороны, и явились причиной снижения пропускных способностей ГТс [2] и ухудшения городских экологических показателей — с другой, а отсутствие планировочного единства и взаимодействия отдельных видов и звеньев городской транспортной системы (ГТС) привели к значительным перепробегам транспорта и чрезмерным затратам времени на поездки. Следствием стало снижение показателей эффективности ГТС. Ухудшение экономики города и рейтинга качества городской среды. Таким образом, функциональные сферы целевой интеграции работоспособного транспортного процесса [3] посредством разветвленной ГТс пронизывают и скрепляют всю социально-экономическую, технологическую и культурную систему города, определяя его скорость и масштабы развития.

Для стимулирования таких процессов развития вводятся объекты новой транспортной инфраструктуры, включая запуск новых видов внутригородских и пригородных наземных и водных (маршрутное водное такси (аквабус)) пассажирских перевозок. Поэтому в данной ситуации особую актуальность приобретает вопрос: *какое влияние окажет работа того или иного маршрута внутреннего водного или наземного пассажирского транспорта на транспортную ситуацию улично-дорожной сети (УДС) или станций метрополитена и каковы особенности новых транспортных потоков, формирующихся на водных транспортных сетях, методы их оценки, анализа и моделирования.*

Решение этих вопросов предлагается рассмотреть на примере анализа и моделирования процесса перераспределения транспортных потоков (ТП) на ГТс Санкт-Петербурга при введении нового вида внутреннего водного пассажирского транспорта (ВВПТ).

Основная часть

Формально решение проблемы анализа ТП на ГТс, сформированного структурой функционирования его участников в зонах стоп-сигнала, впервые было предложено В. Ф. Адамсом, а полученное им выражение для средней задержки пешехода, вызванной движением ТП на главном шоссе, в котором последовательные интервалы задержки во времени являются независимыми случайными величинами с отрицательным экспоненциальным распределением (ОЭР) в измененном виде, позже использовал Ф. Гарвуд, рассматривая остановки ТрС на регулируемом перекрестке, частично управляемом по основному потоку. Математические модели, связывающие объем и скорость ТП, исследовал Б. Д. Гриншилдс, предложив фундаментальный метод оценки его производительности. Детально задачу поведения дорожного трафика, описываемую ОЭР, исследовали М. С. Рафф и Дж. К. Таннер, а вычисление времени задержки, приходящейся на одного пешехода, используя комбинаторные аргументы, предложил А. Дж. Мэйн. Опираясь на методы теории восстановления, свой вклад в решение проблем регулирования трафика внесли У. С. Джуэл, Г. Х. Вайсс и А. А. Мараудин.

Проведя аналогию с волновой теорией движения, теорией очередей и научными приложениями исследований дорожного трафика, разрабатывают первую макроскопическую модель однополосного транспортного потока М. Дж. Лайтхилл, Г. Б. Уизем (Уитем), и П. И. Ричардс, развитие которой прослеживается в трудах Г. Ф. Невелла [4], Б. С. Кернера [5], Т. Нагатани [6].

Более подробно генеалогия развития моделей ТП по четырем направлениям: фундаментальные связи, микроскопическое, мезоскопическое и макроскопическое направления, была исследована в работе Фемке ван Вагенинген-Кессельс, Ханс ван Линт, Кеес Вуйк, Серге Ноогендоорн (2014) [7]. Позднее Я. А. Селиверстов [8] разработал модель функционально-полного операторного

базиса системы управления ГТС, опирающейся на целевые ориентиры пользователя и ГТС, укладывая в целевые ориентиры пользователя первый принцип Вардропы и дополняя его принципом безопасного следования, а в целевые ориентиры ГТС — второй принцип Вардропы, дополняя его принципом надежного функционирования. Таким образом, обобщенный поведенческий базис обретает теоретическую завершенность, позволяя ставить задачи интеллектуализации систем управления транспортными процессами [9] – [11].

Вместе с тем развитие непрерывных систем наблюдения фиксирования и контроля транспортных процессов на ГТС актуализировало существующие методы автоматической группировки [12], позволив формализовать вопросы самоорганизации транспортных процессов и решить задачи построения бесконфликтных транспортных систем [13], [14]. В [15] рассмотрены методы восстановления и обновления матриц корреспонденций и дан их краткий обзор. Позднее в [16] был предложен алгоритм расчета матриц пассажирских корреспонденций пригородного сообщения на основании емкостей по отправлению и прибытию пассажиров на остановочные пункты, а в [17] приведена методика определения сбалансированной емкости транспортных районов центральной части города по прибытию и отправлению автомобилей за счет включения в расчет количества автомобилей, осуществляющих движение по транспортной сети; в [18] рассмотрены методы построения матриц корреспонденций и алгоритмы калибровки, программная реализация которых легла в основу модели EVA, получившей практическое применение в [19]. Рассмотрев анализ предметной области, перейдем к постановке задачи настоящего исследования пассажирских перевозок.

В целях развития транспортной инфраструктуры г. Санкт-Петербурга и полноценного использования водного пространства реки Невы внедрение мирового опыта в области водных внутригородских пассажирских перевозок является в особой степени актуальным.

Целью исследования является анализ провозной способности маршрута «Приморской линии» ВВПТ г. Санкт-Петербурга, разработка ее информационно-логической модели и оценка ее эффективности. Изложение уместно начать с формального описания трилинейной модели (EVA), являющейся ядром программно-аппаратных систем моделирования городских транспортных процессов.

Трилинейная модель EVA, рассмотренная в [20], одновременно дает формальное представление процессов создания, распределения и разделения ТП. В ней объем ТП из мест района отправления в места района прибытия рассчитывается на основе демографических и структурных показателей, а также степени подвижности, известной в результате статистических исследований характера передвижений населения. Расчет выполняется отдельно для каждого слоя спроса, и, соответственно, для каждой пары действий с ее основными группами.

Группы «место отправления – место прибытия» — это дезагрегированные, однородные по поведению транспортные классы, выведенные из цепочки активностей (последовательности перемещений). Каждое перемещение, направленное на определенное действие, относится к определенным категориям источников (D — дом) и целей (P — работа) и, таким образом, к соответствующей группе «место отправления – место прибытия» ($D — P$). С «создаваемой стороны» к группе «источник — цель» относится как минимум одна базовая группа населения и со «стороны притяжения» как минимум одна величина структуры. Например, к группе «источник — цель» $D — P$ (дом — работа) со стороны источника относится основная базовая группа населения «трудящиеся».

Группы могут быть разделены на подгруппы по дополнительным признакам и использоваться для создания транспортного спроса. Таким образом, процесс классификации городского населения по слоям спроса задается следующим образом: каждой паре «место отправления (i) – место прибытия (j)», отражающей определенный слой спроса $DStr_c$ из множества $DStr_c \in DStr$, оператор классификации f_ψ^d ставит в соответствие свойство структуры $SG_{i(j)s}$ из множества $SG_{i(j)}$, отражающее этот слой спроса:

$$f_\psi^d : DStr_c \rightarrow SG_{i(j)s}. \quad (1)$$

Для каждого слоя спроса и для каждой группы людей, используемой в данном слое, должны быть определены степени подвижности (MR). Степень подвижности группы определяется как среднее количество перемещений в день на человека:

$$MR_{pc} = \frac{\text{Количество произведенных в слое спроса передвижений в группе } p}{\text{Количество людей в группе } p}. \quad (2)$$

На этапе создания транспортного движения из приведенных данных социальной структуры населения и характеристик для всех слоев спроса рассчитывается объем ТП из источника Q_{ic} и объем ТП в цель Z_{jc} или верхние границы $Q_{ic}^{\max}$ и $Z_{jc}^{\max}$ для этих объемов. Метод расчета зависит от того, к какому типу источника-цели относится данная пара действий слоя спроса. Возможны три типа: действие источника — действие на месте зарождения (собственная квартира, собственная работа); действие цели — действие на месте зарождения (собственная квартира, собственная работа); действие источника — действие цели $\neq$ действию на месте зарождения (собственная квартира, собственная работа).

Правила выполнения расчета приведены в таблице. Данная модель опирается на байесовскую вероятность. Постулируется принцип формирования потока: перемещение пользователя h начинается в транспортном районе i , заканчивается в транспортном районе j , при этом используется транспортное средство k .

Создание транспортного движения в модели EVA

1. Модель создания транспортного движения в модели EVA: тип источник – цель 1	
1-й этап	Объем ТП на месте зарождения H : $H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{ers}$; $H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$
2-й этап	Объем ТП из источника Q , $Q_{\max}$: $Q_{ic} = H_{ic}$
3-й этап	Общий объем потоков V : $V_c = \sum_{i=1}^m Q_{ic}$; $f_c = \frac{V_c}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} v_{lsc}}$
4-й этап	Объем ТП в месте назначения Z , $Z_{\max}$: $Z_{jc} = f_c \sum_{s \in S} ER_{jsc} SG_{js} v_{jsc}$; $Z_{jc} \leq Z_{jc}^{\max} = \sum_{s \in S} ER_{jsc}^{\max} SG_{js} v_{jsc}$; $\hat{Z} = \sum_{s \in S} ER_{jsc}^{\max} SG_{js} v_{jsc}$; $\underline{Z}_{jc} \hat{Z}_{jc} \leq Z_{jc} \leq \bar{Z}_{jc} \hat{Z}_{jc}$; $Z_{jc}^{pot} = \sum_{s \in S} ER_{jsc} SG_{js} v_{jsc}$
2. Модель создания транспортного движения в модели EVA: тип источник – цель 2	
1-й этап	Объем ТП на месте зарождения H : $H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$; $H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$
2-й этап	Объем ТП в месте назначения Z , $Z_{\max}$: $Z_{jc} = H_{jc}$
3-й этап	Общий объем потоков V : $V_c = \sum_{j=1}^m Z_{jc}$; $f_c = \frac{V_c}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} v_{lsc}}$

(Окончание)

4-й этап	Объем ТП из источника $Q, Q_{\max}$: $Q_{ic} = f_c \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} v_{isc}; \quad Q_{ic} \leq Q_{ic}^{\max} = \sum_{s \in S} ER_{isc}^{\max} SG_{is} v_{isc};$ $\hat{Q} = \sum_{s \in S} ER_{isc}^{\max} SG_{is} v_{isc}; \quad \underline{Q}_{ic} \hat{Q}_{ic} \leq Q_{jc} \leq \bar{Q}_{ic} Q_{ic};$ $Q_{ic}^{pot} = \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} v_{isc}$
3. Модель создания транспортного движения в модели EVA: тип источник – цель 3	
1-й этап	Объем ТП на месте зарождения H: $H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}; \quad H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$
2-й этап	Общий объем потоков V: $V_c = \sum_{e=1}^m H_{ec}$
3-й этап	Объем ТП из источника $Q, Q_{\max}$: $Q_{ic} = \frac{\sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} v_{isc}}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} v_{lsc}} V_c$ Объем ТП в месте назначения $Z, Z_{\max}$: $Z_{jc} = \frac{\sum_{s \in S} ER_{jsc}^{\max} SG_{js} v_{jsc}}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} v_{lsc}} V_c$

Обозначения, используемые в таблице: e — индекс района причины перемещений (район места зарождения); i — индекс района источника перемещений; j — индекс района цели перемещений; s — индекс свойства структуры; p — индекс группы; c — индекс слоя спроса; m — количество районов в области исследования; MR_{epc} — степень подвижности группы p за единицу времени; ER_{isc} — степень создания свойства структуры s за единицу времени; BP_{ep} — количество людей в группе p ; SG — свойство структуры; u_{epc} — доля перемещений, реализованных в области исследования как внутренне транспортное движение; v_{isc} — доля свойств структуры, действительная для внутреннего транспортного движения в области исследования; H_{epc} — объем ТП на месте зарождения для группы p ; H_{ec} — общий объем ТП на месте зарождения; Q_{ic} — объем ТП из источника; Z_{jc} — объем ТП в цель; $Q_{ic}^{\max}$ — максимально возможный объем ТП из источника; $Z_{jc}^{\max}$ — максимальный возможный объем ТП в цель; $\underline{Q}_{ic}$, $\bar{Q}_{ic}$ — фактор нижней или верхней границы объема ТП из источника; $\underline{Z}_{jc}$, $\bar{Z}_{jc}$ — фактор нижней или верхней границы объема ТП в цель; Q_{ic}^{pot} — потенциально возможный объем ТП в источнике; Z_{jc}^{pot} — потенциально возможный объем ТП в цели; V_c — общий объем потока; фактор, учитывающий соблюдение балансового условия $V = \sum_i Q_i = \sum_j Z_j$ при расчете объемов ТП районов.

С помощью A_i , E_j , M_k обозначаются события о том, что перемещение начинается в транспортном районе i , заканчивается в транспортном районе j при этом используется транспортное средство k . Предполагается, что эти события происходят независимо друг от друга, тогда безусловные вероятности $P(A_i)$, $P(E_j)$, $P(M_k)$ можно представить в виде

$$P(A_i) = \frac{s_i}{P^\Sigma} \varphi_{s_i}; \quad P(E_j) = \frac{d_j}{P^\Sigma} \varphi_{d_j}; \quad P(M_k) = \frac{tr_k}{P^\Sigma} \varphi_{tr_k}. \quad (3)$$

Условные вероятности из создания ТП примут вид

$$P(A_i|W) = \frac{s_i}{P^\Sigma}; \quad P(E_j|W) = \frac{d_j}{P^\Sigma}; \quad P(M_k|W) = \frac{tr_k}{P^\Sigma}, \quad (4)$$

где $P^\Sigma = \sum_i s_i$ — общий поток транспорта.

Для всех i, j, k определены условные вероятности для принятия перемещения (наступления события W) в виде

$$L_{ijk} = P(W | (A_i \cap E_j \cap M_k)) \quad (5)$$

или отклонения (ненаступления события $\bar{W}$) этого перемещения

$$\bar{L}_{ijk} = P(\bar{W} | (A_i \cap E_j \cap M_k)) = 1 - L_{ijk}. \quad (6)$$

Исходя из предположения о том, что ТП $\rho_{i,j,k}$ пропорциональны условным вероятностям $P(\bar{W} | (A_i \cap E_j \cap M_k))$, следует

$$\rho_{i,j,k} = P((A_i \cap E_j \cap M_k) | W) \cdot P^\Sigma = \frac{P(A_i)P(E_j)P(M_k)P(W | (A_i \cap E_j \cap M_k))}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} P(A_{i'})P(E_{j'})P(M_{k'})P(W | (A_{i'} \cap E_{j'} \cap M_{k'}))} \cdot P^\Sigma. \quad (7)$$

Вероятность может быть квантифицирована с помощью установок, которые следует проверить эмпирическим путем.

Базовая тринейная модель (рис. 1) с условиями контрольных сумм транспортных корреспонденций задается следующим видом:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \rho_{i,j,k} = s_i; \quad \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l \rho_{i,j,k} = d_j; \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{i,j,k} = tr_k; \quad \rho_{i,j,k} = L_{i,j,k} \varphi_{s_i} \varphi_{d_j} \varphi_{tr_k}, \quad (8)$$

где $L_{i,j,k}$ — вероятность оценки; $\varphi_{s_i}, \varphi_{d_j}, \varphi_{tr_k}$ — калибровочные коэффициенты, определяемые эмпирическим или расчетным путем, которые содержат информацию о предпочтении перемещений.

Данная модель позволяет с высокой степенью достоверности оценить величину транспортного предложения и спроса. Достоинством её является возможность учета некоторых данных геоинформационных систем и систем учета статистических данных. При создании транспортного движения в модели используется список специфических классов поведенческой активности населения [20], классов транспортных средств, что делает возможным описание поведения городского населения в границах пассажирского и служебного транспорта. К недостаткам данной модели можно отнести невозможность учета грузового транспорта, неподвижного транспорта, объектов социальной и транспортной инфраструктуры.

Абстрактная система классификации транспортной активности городского населения, принятая в модели EVA, не позволяет производить анализ транспортной активности в границах системы государственной статистики Российской Федерации. В модели затруднена реализация обратной связи с участниками транспортного процесса.

В проекте были использованы следующие исходные данные: социальная статистика транспортных районов (трудящиеся, рабочие места, население, рабочие места в сфере услуг и т. п.); улично-дорожная сеть (структура дорожной сети с показателями пропускной способности, количества полос, скорости); данные о количестве ТС в ключевых узлах для калибровки модели; характеристики общественного транспорта (остановки, маршруты и расписания автобусов, троллейбусов, трамваев, метро и маршрутных такси) и др. Так как проект осуществлялся на основе апробированной городской модели, некоторые из приведенных ранее статистических данных уже содержались в городской модели.

Трилинейная модель

s_i Источник зарождения
транспортного потока

d_j Сток поглощения
транспортного потока

tr_k Тип транспортного средства

tr_k	Метро	Троллейбус	Автобус	Трамвай	Маршрутка	Водный транспорт	Личный транспорт	Σs_i
s_i								
s_1	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	
s_i								
Σtr_k								

d_j	d_1	d_2		d_j	Σs_i
s_i					
s_1	ρ_{11}	ρ_{12}		ρ_{1j}	
s_i					
Σd_j					

tr_k	Метро	Троллейбус	Автобус	Трамвай	Маршрутка	Водный транспорт	Личный транспорт	Σd_j
d_j								
d_1	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}	
d_j								
Σtr_k								

Рис. 1. Матрицы корреспонденций трилинейной модели

Сбор отсутствующих данных для разработки логической модели транспортного процесса и ее последующей калибровки проводился по двум направлениям: вначале собиралась и уточнялась информация о транспортной инфраструктуре районов, прилегающих к маршруту «Приморская линия» ВВПТ, уточнялась характеристика транспортного тяготения (характеристика улично-дорожной сети, структура населения, места работы, учебы) и характеристика городского пассажирского транспорта (расположение остановок, маршруты, расписания ГПТ), затем проводились сбор и оценка данных транспортной статистики на маршрутах ВВПТ и ГПТ.

Тип данных: объем пассажиропотока (пасс./сут), интервал движения общественного транспорта (мин), скорость транспортного потока (км/ч). Сбор статистических данных на маршруте «Приморская линия» ВВПТ осуществлялся в течение восьми дней с 8.00 – 20.00 на остановочных пунктах: 1. Арсенальная наб. (напротив пл. Ленина). 2. Петроградская наб. спуск № 3. 3. Аптекарская наб. (напротив дома № 5 по ул. Академика Павлова). 4. Приморский пр. (напротив станции метро «Черная речка»), спуск № 2, 5. Приморский пр. (юго-восточнее дома № 22, лит. А), спуск № 5, 6. Приморский пр. (ниже 3-го Елагина моста).

По маршруту «Приморская линия» курсируют 2 – 4 судна «Hitek 85C» вместимостью до 12 чел. В процессе регистрации статистических данных пассажирам был задан вопрос: *Какова цель поездки по маршруту «Приморская линия»?* Предлагалось два варианта ответа: развлекательная / туристическая, обычная пассажирская. Также в течение 10 поездок регистрировалась средняя скорость аквабуса на маршруте «Приморская линия», которая составила 58 км/ч. Из рис. 2 видно, что наибольшую нагрузку пассажиропотока маршрут «Приморская линия» ВВПТ испытывает по выходным дням (суббота, воскресенье) на начальном (182 чел.) и конечном остановочном пункте (ОП) (227 чел.). В течение рабочей недели нагрузка

пассажиров на маршруте «Приморская линия» ВВПТ резко снижается, о чем свидетельствуют статистические данные. При этом необходимо отметить, что их величина на начальном и конечном отрезке пути значительно превышает значение количества пассажиропотоков, осуществивших посадку на промежуточных отрезках пути маршрута «Приморская линия» ВВПТ. По результатам опроса можно сделать вывод, что преимущественная часть пассажиропотока имеет развлекательно-туристический вектор, а именно: 74 % воспользовались маршрутом ВВПТ «Приморская линия» как туристы; 26 % составили рядовые пассажиры.

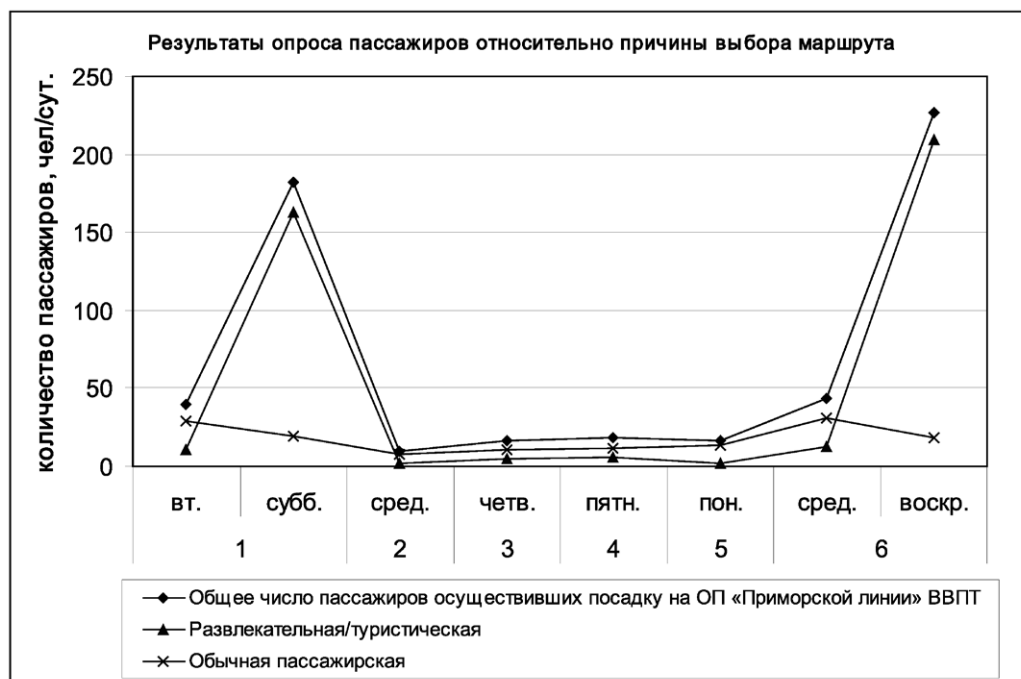


Рис. 2. Результаты опроса пассажиров относительно причины выбора маршрута

В процессе работы также проводилось исследование скорости транспортного потока на УДС в районах, прилегающих к остановочным пунктам ВВПТ «Приморской линии». В результате которого было установлено, что УДС в районах, прилегающих к остановочным пунктам ВВПТ маршрута «Приморская линия» находится под постоянной нагрузкой в часы пик, так как связывает центральную часть Санкт-Петербурга с его северной и южной частью.

Наиболее высокая плотность движения наблюдалась на Арсенальной наб., Пироговской наб., Б. Сампсониевском пр., Кантемировской ул., ул. Академика Крылова, Ушаковской наб., Торфяной дороге, ул. Савушкина и пр. Маршала Блюхера. Средняя скорость движения транспортного потока на этих участках составляет 10 км/ч. На участках УДС – Б. Сампсониевский пр., ул. Академика Лебедева, ул. Куйбышева скорость движения транспортного потока составляет 15 – 30 км/ч. В данной ситуации маршрут ВВПТ «Приморская линия» способен немного снизить нагрузку на прилегающую транспортную сеть, увеличив ее устойчивость к внезапным негативным транспортным факторам.

Таким образом, разработка информационно-логической прогнозной модели «Приморской линии» ВВПТ выполнена с помощью программы PTV Vision® VISUM. В качестве исходных данных использовались городская базовая транспортная модель городского общественного пассажирского транспорта г. Санкт-Петербурга, 2009 г. (380 транспортных района, 4400 примыканий, 32000 уз, население 4650 тыс. чел.), общие сведения об исследуемых районах, данные статистики, данные транспортных структур (типы дорог, среднегодовая суточная интенсивность, пропускная способность в час).

Прогнозная модель распределения транспортных потоков на УДС СПб и внутренней сети метрополитена, прилегающих к маршруту «Приморская линия» ВВПТ, включала два сценария: моделирование транспортной ситуации до ввода в эксплуатацию маршрута «Приморская линия» ВВПТ и моделирование транспортной ситуации после ввода в эксплуатацию маршрута «Приморская линия» ВВПТ. Связь района с сетью осуществляется через примыкание (виртуальные отрезки) его центра тяжести к узлам транспортной сети, так же, как генерация и поглощение транспортных потоков данным районом.

Моделирование и расчет распределения транспортных потоков на УДС СПб и внутренней сети метрополитена в зоне, прилегающей к остановочным пунктам ВВПТ маршрута «Приморская линия», осуществлялся согласно транспортной модели 1 — до ввода в эксплуатацию маршрута «Приморская линия» ВВПТ (рис. 3) и согласно транспортной модели 2 — с вводом в эксплуатацию маршрута «Приморская линия» ВВПТ (рис. 4).

Транспортная модель состоит из основополагающих моделей: модели транспортного предложения, модели транспортного спроса и моделей воздействия [18]. Модель транспортного предложения — это транспортная сеть, состоящая из узлов (перекрестков, развязок и т. д.) и соединяющих их ребер (улиц, дорог и т. д.), которая предоставляет возможность перемещения для участников транспортного движения и описывает затраты на данные перемещения. Модели спроса на транспорт можно охарактеризовать как математические «инструменты», описывающие качественно и количественно перемещения в связи с причинами возникновения транспортного потока: выбор активностей (*модель генерации транспортного движения*), выбор цели транспортного потока (*модель распределения транспортного движения*), выбор транспортного средства (*модель разделения транспортного движения*) и выбор пути (*модель перераспределения транспортного движения*).

Выводы

В результате прогнозного моделирования было установлено, что введение ВВПТ маршрута «Приморская линия» вызовет изменение суточного пассажиропотока на УДС в пределах менее 0,1 %, на станциях метрополитена менее 0,3 %. Эпюры распределения пассажиропотоков на УДС, внутренней сети метрополитена и ВВПТ маршрута «Приморская линия» приведены на рис. 5 и 6. Модели продемонстрировали высокую скорость сходимости при работе с матрицами большой размерности 800×800 .

Ввод в эксплуатацию ВВПТ маршрута «Приморская линия» способен повысить устойчивость пассажирской транспортной сети, ее провозную и пропускную способность. В целях опережающего развития ВВПТ инфраструктуры г. Санкт-Петербурга следует оценить темпы роста жилищного строительства, направленные на создание намывных территорий в таких районах, как оз. Лахтинский Разлив; Парк 300-летия Санкт-Петербурга; Южно-Приморский парк. Намывные анклавы необходимо связать с единой ГТС, обеспечив ее устойчивое функционирование. При решении этой транспортной проблемы возникает ряд сложностей:

— *технические* — существующий участок УДС Северо-Запада испытывает дефицит пропускной способности — средняя скорость транспортного потока на таких магистралях, как ул. Савушкина, Приморский пр. не превышает в часы пик 30 км/ч, следовательно, дополнительный рост пассажиропотока на УДС, без увеличения ее пропускной способности, может привести к транспортным заторам и увеличению времени поездок;

— *экономические* — не всегда удается изыскать достаточное количество бюджетных средств для строительства новых транспортных коммуникаций, а строительство платных дорог в сложившейся неблагоприятной социально-экономической обстановке может повлечь за собой увеличение пассажиропотока на бесплатных участках УДС.

Таким образом, становится актуальным использование ВВПТ маршрута «Приморская линия» в качестве резервного при соединении будущих намывных территорий Северо-Запада с ГТС. Для этого ВВПТ маршрута «Приморская линия» может быть продлена на 2 км (вариант 1 рис. 7), а при развитии зоны «Крестовская отмель» — на 2,6 км (вариант 2 рис. 7).

Работа выполнялась при поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга в 2011 г.



Рис. 3. Транспортная модель 1. Маршрутная транспортная сеть

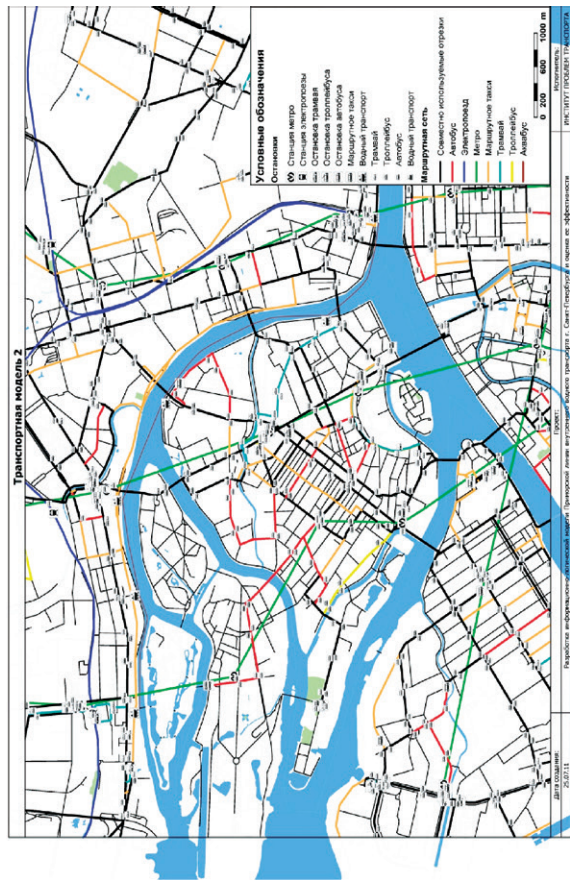


Рис. 4. Транспортная модель 2. Маршрутная транспортная сеть

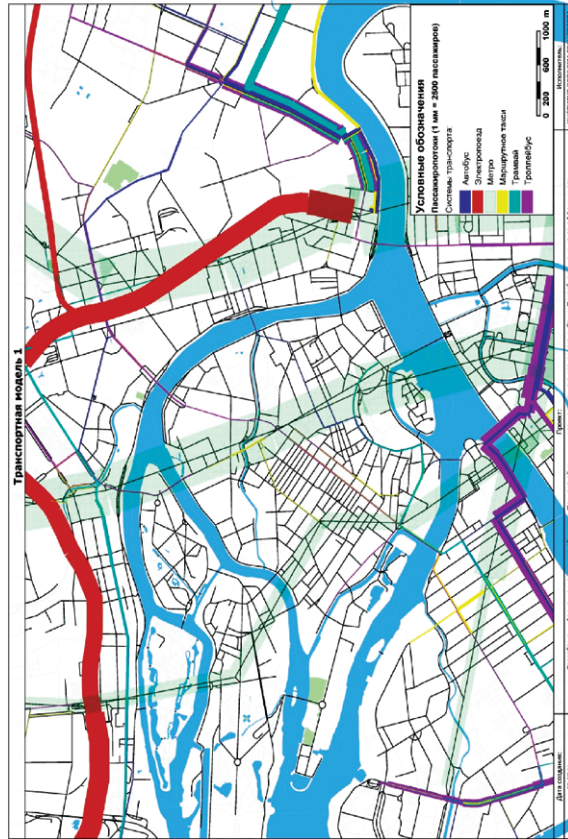


Рис. 5. Результаты расчета транспортного спроса и предложения (модель № 1)

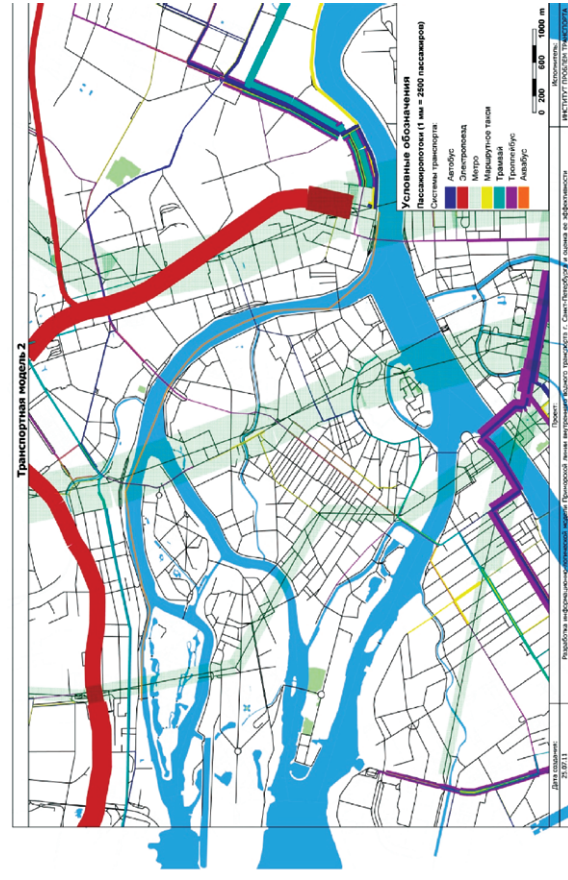


Рис. 6. Результаты расчета транспортного спроса и предложения (модель № 2)

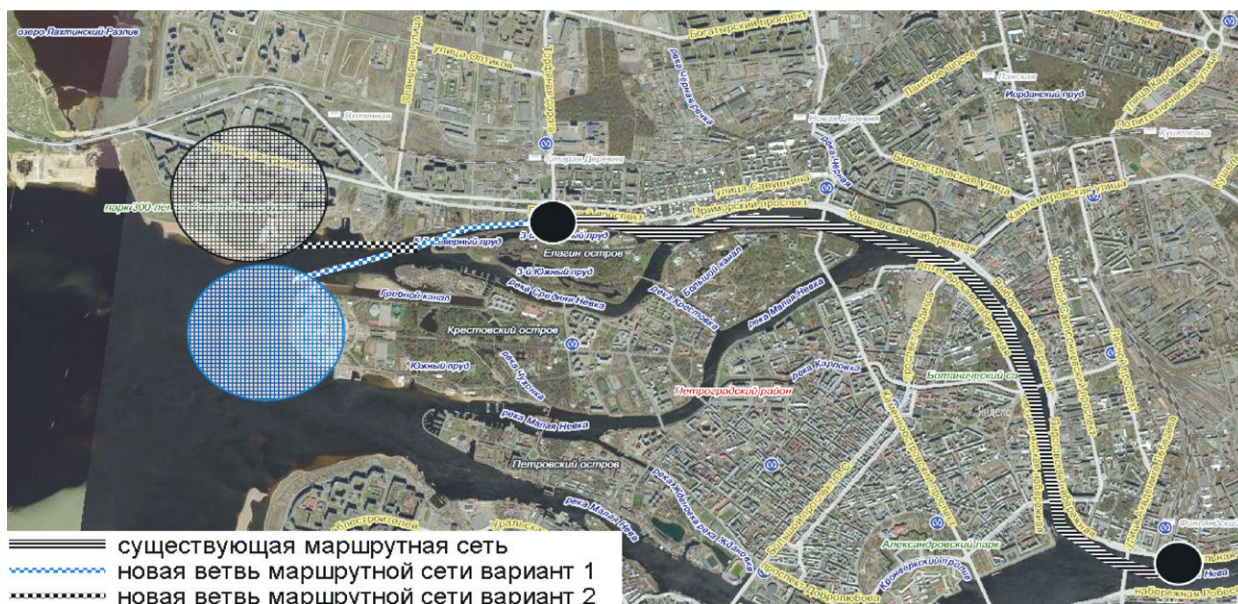


Рис. 7. Схема возможного развития ВВПТ маршрута «Приморская линия»

Список литературы

1. Белый О. В. Фундаментальные проблемы развития транспортного комплекса / О. В. Белый // Экономика качества. — 2013. — № 3. — С. 23–28.
2. Белый О. В. О безопасности движения автомобильного транспорта на дорогах России / О. В. Белый // Транспорт: наука, техника, управление. — 2011. — № 2. — С. 30–33.
3. Кокаев О. Г. О технологии анализа транспортных процессов в современных условиях хозяйствования / О. Г. Кокаев, О. Ю. Лукомская, С. А. Селиверстов // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 2 (39). — С. 32–36.
4. Newell G. F. A simplified car-following theory: a lower order model // Transportation Research Part B. — 2002. — PP. 195–205.
5. Kerner B. S., Klenov S. L., Wolf D. E. (2002) Cellular automata approach to three-phase traffic theory. J Phys A Math Gen 35 (47). doi:10.1088/0305-4470/35/47/303.
6. Nagatani T.: The physics of traffic jams. Rep. Prog. Phys. 65, 1331–1386 (2002).
7. Hans van Lint, Serge P. Hoogendoorn, Marco Schreude. Multi-Class First Order Traffic Flow Modeling. Traffic and Granular Flow '07. 2009. — P. 421–426.
8. Селиверстов Я. А. Построение моделей управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды / Я. А. Селиверстов, А. Н. Стариченков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2014. — № 6 (210). — С. 81–94.
9. Селиверстов Я. А. О построении модели классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса / Я. А. Селиверстов // Интернет-журнал «Науковедение». — 2014. — № 5 (24). — С. 1–12. [Электронный ресурс] — М.: Науковедение, 2014. — Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/159TVN514.pdf>, свободный. — Загл. с экрана.
10. Селиверстов Я. А. Использование правила резолюций в вопросно-ответной процедуре транспортного планировщика / Я. А. Селиверстов // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 145–152.
11. Селиверстов Я. А. Особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов, А. Л. Стариченков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2015. — № 1. — С. 29–36.

12. Селиверстов С. А. Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы / С. А. Селиверстов // Вестник ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — Вып. 2(24). — С. 92–100.
13. Селиверстов С. А. Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения / С. А. Селиверстов, Я. А. Селиверстов // Интернет-журнал Науковедение. — 2014. — № 3. — С. 122.
14. Лукомская О. Ю. Модели и алгоритмы оптимальности регулярных транспортных потоков с использованием интеллектуальных систем управления судопропуском / О. Ю. Лукомская // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2014. — № 5. — С. 34–37.
15. Швецов В. И. Проблемы моделирования передвижений в транспортных сетях / В. И. Швецов // Труды МФТИ. — 2010. — С. 169–179.
16. Горбачев П. Ф. Моделирование спроса на перевозку пассажиров в пригородном сообщении / П. Ф. Горбачев, В. И. Крикун // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — № 3 (62). — С. 12–15.
17. Горбачев П. Ф. Методика расчета емкостей транспортных районов с учетом динамических процессов в транспортной системе / П. Ф. Горбачев, А. С. Колий // Автомобильный транспорт. — 2012. — № 30. — С. 139–143.
18. Швецов В. И. Алгоритмы распределения транспортных потоков / В. И. Швецов // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 10. — С. 148–157.
19. Селиверстов Я. А. Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах / Я. А. Селиверстов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2013. — № 1. — С. 43–49.
20. Traffic. Mobility. Logistics. PTV Vision. Visum 11.0. Basics. 2009. PTV AG. Karlsruhe. — 692 p.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 539.386: 519.6: 629.12

М. В. Сухотерин,
д-р техн. наук, проф.;

С. О. Барышников,
д-р техн. наук, проф.;

Е. В. Потехина,
доц.

О РАСЧЕТАХ ПЛАСТИН ПО СДВИГОВЫМ ТЕОРИЯМ

ON SETTLEMENT PLATES IN SHEAR THEORIES

Рассмотрена сдвиговая теория Рейсснера и её аналоги. По теории Рейсснера приводится решение задач изгиба прямоугольных пластин двух видов: защемленной по контуру и консольной под действием равномерной нагрузки. Для решения используется итерационный метод суперпозиции исправляющих функций, которые представляют собой гиперболотригонометрические ряды по двум координатам. В качестве основного приближения для функции прогибов выбран многочлен, удовлетворяющий основному дифференциальному уравнению изгиба и условиям отсутствия прогибов защемленных граней. Исправляющие функции прогибов являются бигармоническими; исправляющие функции напряжений удовлетворяют уравнению Гельмгольца. Указанные функции, удовлетворяя условиям на двух параллельных кромках, на двух других порождают невязки. Процесс взаимного устранения невязок приводит в пределе к точному решению.

The article discusses shear theory of Reissner and its analogues. There is a solution according to the theory of Reissner tasks bending of rectangular plates of two types: edges contour and console under the action of uniform load. The iterative method of superposition correcting functions, which are two-dimensionally hyperbolic-trigonometric series, is used for the solution. As a basic approximation for the function of the deflections it was selected polynomial satisfying the basic differential equation of the curve and the absence of deflections pinched faces. Correcting deflection functions are biharmonic; the correcting stress functions satisfies the Helmholtz equation. These functions satisfy the conditions on two parallel edges, the other two generate residuals. The process of mutual elimination of residuals leads in the limit to the exact solution. The obtained numerical results are discussed.

Ключевые слова: сдвиговая теория, прямоугольная защемленная по контуру и консольная пластины Рейсснера, изгиб, гиперболотригонометрические ряды.

Key words: shear theory, rectangular edges contour and console plate of Reissner, bending, hyperbolic-trigonometric series.



ПЛАСТИНЫ являются расчетной схемой многих элементов конструкций (современное судно на 90 % состоит из пластин). В отраслях техники, связанных с высокими технологиями (авиационная и космическая техника, судостроение, энергетика), стремление к снижению веса конструкции и отдельных её элементов повышает требования к точности прочностных расчетов. Во многих случаях «старые» испытанные теории уже не дают удовлетворительных результатов, и исследователи либо пытаются увеличить точность вычислений, либо обращаются к уточненным теориям, которые резко усложняют математическую модель задачи.

При выводе соотношений между напряжениями и прогибом в классической теории [1] игнорируется искажение элементов пластины, вызываемое перерезывающими силами, равносильное предположению о том, что при модуле сдвига $G_z = \infty$ пластина перестает быть изотропной. Она не реагирует на кручение, производимое некоторой парой, приложенной к цилиндрической поверхности пластины, если вектор пары совпадает с нормалью к этой поверхности. Такое упрощение позволяет заменить приращение крутящих пар $\partial M_{xy} / \partial y$, обусловленных горизонтальными

касательными напряжениями по краю пластины, воздействием вертикальных сил Q_x или Q_y , приложенных по тому же краю, и тем самым снизить число граничных условий с трех до двух. Эта теория дает для прогиба дифференциальное уравнение четвертого порядка с двумя граничными условиями по каждому краю. Указанная неточность классической теории может с ростом относительной толщины пластины существенно изменять НДС вблизи её контура (особенно в окрестностях точек, где происходит резкая смена граничных условий), а также вблизи малых отверстий и точек приложения сосредоточенных сил.

Теория Рейсснера учитывает деформации поперечного сдвига, производимые перерезывающими силами Q_x и Q_y , при изгибе. Э. Рейсснер [2] предложил принять линейный закон для распределения компонентов напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} по толщине $-h/2 \leq z \leq h/2$ пластины [1]:

$$\sigma_x = 12M_x z / h^3; \quad \sigma_y = 12M_y z / h^3; \quad \tau_{xy} = -12M_{xy} z / h^3, \quad (1)$$

что приводит к следующим выражениям для остальных напряжений:

$$\tau_{yz} = \frac{3Q_y}{2h} \left[1 - \left(\frac{2z}{h} \right)^2 \right]; \quad \tau_{zx} = \frac{3Q_x}{2h} \left[1 - \left(\frac{2z}{h} \right)^2 \right]; \quad \sigma_z = -\frac{3q}{4} \left[\frac{2}{3} - \frac{2z}{h} + \frac{1}{3} \left(\frac{2z}{h} \right)^3 \right]. \quad (2)$$

Первые пять соотношений (1) и (2) совпадают с аналогичными соотношениями классической теории. Отличие состоит лишь в выражении для δ_z , которое в обычной теории полагалось равным нулю. Здесь q — поперечная нагрузка.

Изгибающие и крутящий моменты определяются по формулам:

$$M_x = D \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \nu \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} + \frac{6\nu(1+\nu)}{5Eh} q \right); \quad M_y = D \left(\frac{\partial \varphi_y}{\partial y} + \nu \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \frac{6\nu(1+\nu)}{5Eh} q \right);$$

$$M_{xy} = -D \frac{1-\nu}{2} \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \right), \quad (3)$$

где $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$ — жесткость; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; φ_x , φ_y — средние значения угловых деформаций (поворотов) сечений x , $y = \text{const}$.

Средние значения угловых деформаций сечений имеют вид:

$$\varphi_x = -\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{12}{5} \frac{1+\nu}{Eh} Q_x; \quad \varphi_y = -\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{12}{5} \frac{1+\nu}{Eh} Q_y, \quad (4)$$

где w — среднее по толщине пластины значение прогибов пластины.

С учетом (4) формулы (3) запишутся в виде:

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{h^2}{5} \frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{qh^2}{10} \frac{\nu}{1-\nu}; \quad M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \frac{h^2}{5} \frac{\partial Q_y}{\partial y} - \frac{qh^2}{10} \frac{\nu}{1-\nu};$$

$$M_{xy} = (1-\nu)D \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \frac{h^2}{10} \left(\frac{\partial Q_x}{\partial y} + \frac{\partial Q_y}{\partial x} \right). \quad (5)$$

Перерезывающие силы будут связаны уравнениями:

$$Q_x - \frac{h^2}{10} \nabla^2 Q_x = -D \frac{\partial(\nabla^2 w)}{\partial x} - \frac{h^2}{10(1-\nu)} \frac{\partial q}{\partial x}; \quad Q_y - \frac{h^2}{10} \nabla^2 Q_y = -D \frac{\partial(\nabla^2 w)}{\partial y} - \frac{h^2}{10(1-\nu)} \frac{\partial q}{\partial y}, \quad (6)$$

где ∇^2 — двумерный оператор Лапласа.

Для средних прогибов Э. Рейсснером было получено уравнение

$$D \nabla^2 \nabla^2 w = q - \frac{h^2}{10} \frac{2-\nu}{1-\nu} \nabla^2 q, \quad (7)$$

которое при равномерной нагрузке совпадает с уравнением изгиба пластины Кирхгоффа.

Для явного представления перерезывающих сил вводится некоторая новая функция ψ (функция напряжений) с помощью двух соотношений:

$$Q_x = Q_x^* - D \frac{\partial(\nabla^2 w^{**})}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad Q_y = Q_y^* - D \frac{\partial(\nabla^2 w^{**})}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (8)$$

Здесь средний прогиб представлен суммой $w = w^* + w^{**}$ какого-либо частного решения уравнения (7) и бигармонической составляющей, а силы Q_x^* , Q_y^* удовлетворяют уравнениям:

$$Q_x^* - \frac{h^2}{10} \nabla^2 Q_x^* = -D \frac{\partial(\nabla^2 w^*)}{\partial x} - \frac{h^2}{10(1-\nu)} \frac{\partial q}{\partial x}; \quad Q_y^* - \frac{h^2}{10} \nabla^2 Q_y^* = -D \frac{\partial(\nabla^2 w^*)}{\partial y} - \frac{h^2}{10(1-\nu)} \frac{\partial q}{\partial y}. \quad (9)$$

Для определения функции напряжений получено второе фундаментальное уравнение:

$$\nabla^2 \psi - \frac{10}{h^2} \psi = 0. \quad (10)$$

Уравнения (7) и (10) составляют фундаментальную систему дифференциальных уравнений задачи изгиба пластины Рейсснера [1]:

$$D \nabla^2 \nabla^2 \tilde{w} = q - \frac{h^2}{10} \frac{2-\nu}{1-\nu} \nabla^2 q; \quad \nabla^2 \psi - \frac{10}{h^2} \psi = 0. \quad (11)$$

Эта система позволяет удовлетворить трем граничным условиям на элементах контура пластины. Для общего случая элемента цилиндрической боковой поверхности пластины, заданного направлениями касательной τ и нормали n , граничные условия будут:

- на защемленной кромке $w = 0$, $\varphi_n = 0$, $\varphi_\tau = 0$;
- на свободной кромке $Q_n = 0$, $M_n = 0$, $M_{n\tau} = 0$;
- на опертой кромке $w = 0$, $M_n = 0$, $M_{n\tau} = 0$.

Функция $\psi(x, y)$ является краевым потенциалом, определяющим напряженное состояние пластины вблизи ее края или другой линии возмущения, вдоль которой нарушается непрерывность геометрии пластины, нагрузки и т. п.

Для прямоугольной пластины, изгибаемой равномерной поперечной нагрузкой, система (11) в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\nabla^2 \nabla^2 w(x, y) = -1; \quad \psi(x, y) - \alpha \nabla^2 \psi(x, y) = 0. \quad (12)$$

Здесь равномерная нагрузка направлена в отрицательную сторону оси oz ; углы поворота, моменты и перерезывающие силы примут вид:

$$\begin{aligned} \varphi_x &= \frac{\partial}{\partial x} (w + \alpha_1 \nabla^2 w) - \alpha_1 \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad \varphi_y = \frac{\partial}{\partial y} (w + \alpha_1 \nabla^2 w) + \alpha_1 \frac{\partial \psi}{\partial x}; \\ M_x &= - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \nabla^2 w \right) + \alpha_2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} + \alpha_3; \\ M_y &= - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial y^2} \nabla^2 w \right) - \alpha_2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} + \alpha_3; \\ Q_x &= - \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 w + \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad Q_y = - \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 w - \frac{\partial \psi}{\partial x}; \\ M_{xy} &= (1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \nabla^2 w - \alpha \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

где w — относительный прогиб (средний прогиб, отнесенный к величине qb^4/D); координаты x, y отнесены к размеру b пластины; ψ — функция напряжений (отнесена к величине qb^2); h — относительная толщина пластины (толщина, отнесенная к размеру b пластины); $\gamma = \alpha/\beta$; $\alpha = h^2/10$; $\alpha_1 = 2\alpha/(1-\nu)$; $\alpha_2 = 2\alpha$; $\alpha_3 = \nu\alpha/(1-\nu)$.

Дискуссии о пределах применимости теорий Кирхгофа, Пуассона и Рейсснера посвящены работы В. В. Васильева [3] – [4], А. Л. Гольденвейзера [5], П. А. Жилина [6] – [8] и др. В частности, В. В. Васильев [3] отмечает, что существуют задачи, которые теория Кирхгофа не позволяет решить (например, задача о кручении пластины моментами, распределенными по двум противоположным сторонам) или дает неверные результаты (изгиб пластины параболическим штампом). Автор считает, что асимптотический метод А. Л. Гольденвейзера [5] в уточненной теории является неоднозначным и приближенным. А. Л. Гольденвейзер в сдвиговой теории разделяет напряженное состояние на внутреннее и краевое, утверждая, что система (11) неверна, так как не следует из асимптотического метода. П. А. Жилин [6] отмечает, что теория Рейсснера хорошо согласуется с трехмерной теорией упругости, а теорию Кирхгофа следует рассматривать как асимптотическое следствие теории Рейсснера. Однако непосредственное использование теории Рейсснера в численных расчетах на ЭВМ автор считает малоприменимым, предлагая в явном виде выделять так называемую погранслойную часть решения.

В работе [4] обсуждаются критерии применимости классической и сдвиговой теорий. В настоящее время считается, что область применимости классической теории ограничивается задачами определения не слишком сильно изменяющегося НДС пластины в точках, достаточно удаленных от ее краев и линий возмущения. Эта теория может не действовать, когда краевые явления явно или опосредованно играют в задаче основную роль.

В сдвиговой теории пластины опорные реакции совпадают с контурными поперечными усилиями Q_x, Q_y , которые уравнивают давление на пластину, исключая какие-либо угловые силы в случае свободного опирания контура, что имеет место в теории Кирхгофа. С учетом того, что в пространственных тонкостенных конструкциях прямоугольные панели передают нагрузку на подкрепляющие элементы (силовой набор) через опорные реакции, П. А. Жилин [7] предупреждает о возможных негативных последствиях формального использования классической теории пластин в вычислительных комплексах (сеточных, МКЭ и др.).

Исторически первый вариант сдвиговой теории был предложен в работах Э. Рейсснера. Затем появились и другие уточненные теории, использующие гипотезы, в различной степени учитывающие деформацию поперечного сдвига. В настоящее время число работ, посвященных уточнению классической теории пластин, довольно велико, хотя практических результатов получено немного. Так, В. В. Васильев [4] отмечает, что все относительно корректно построенные сдвиговые теории, независимо от частных гипотез, которые находятся в их основе, приводятся к неоднородному бигармоническому уравнению для проникающей составляющей решения, аналогичному

$$D\nabla^2\nabla^2\psi = p, \quad (14)$$

где $\psi(x, y)$ — потенциал, через который выражается прогиб

$$w = \psi - \frac{D}{C}\nabla^2\psi \quad \text{при} \quad C = \frac{Eh}{2(1+\nu)} \quad (15)$$

и уравнению Гельмгольца для краевой составляющей:

$$\nabla^2\psi - k^2\psi = 0 \quad \text{при} \quad k^2 = 12/h^2. \quad (16)$$

Часто в литературе пластины, рассчитанные по сдвиговой модели, называют пластинами типа Тимошенко или Рейсснера – Тимошенко и т. д., хотя приоритет принадлежит, безусловно, Э. Рейсснеру. Другие варианты сдвиговой теории предложены в работах А. Кромма, Г. Генки, Р. Миндлина, М. В. Дубинкина, А. К. Галиныша, С. А. Амбарцумяна и др.

П. А. Жилин [8] отмечает, что в уточненных теориях предложены различные значения коэффициента поперечного сдвига: $5/6$ (Э. Рейсснер), $\pi^2/12$ (Р. Миндлин), $5/(6 - \nu)$ (П. Жилин), для которых определен круг задач, где их использование дает более точные результаты.

Численных результатов расчета пластин с защемленно-свободными гранями по сдвиговым теориям весьма мало. Это объясняется сложностью краевой задачи. Представим решение двух сложных задач для прямоугольных пластин: задачи изгиба защемленной по контуру и консольной пластины под действием равномерной нагрузки. Решение получено методом бесконечной суперпозиции исправляющих функций [9], [10].

Прямоугольная пластина Рейсснера, защемленная по всему контуру, под действием равномерной нагрузки. Задача описана двумя фундаментальными уравнениями (12) и граничными условиями на каждой кромке $x = \pm \gamma/2$; $y = \pm 1/2$:

$$w = 0; \varphi_x = 0; \varphi_y = 0, \quad (17)$$

где углы поворота граней приведены в формулах (13).

Частное решение первого уравнения (12), не дающее прогибов на контуре пластины, возьмем в виде многочлена

$$w_0(x, y) = -\frac{1}{8} \left(x^2 - \frac{\gamma^2}{4} \right) \left(y^2 - \frac{1}{4} \right). \quad (18)$$

Эту функцию будем называть нулевым приближением. Она вызывает поворот заделанных сечений, т. е. невязки в граничных условиях (при $x = -\gamma/2$ и $y = -1/2$ они имеют противоположные знаки), которые разложим в ряды Фурье:

$$\begin{aligned} \varphi_{x0} \Big|_{x=\frac{\gamma}{2}} &= -\frac{\gamma}{8} \left(y^2 - \frac{1}{4} + 2\alpha_1 \right) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{k^*} a_{k0} \cos \lambda_k y; & \varphi_{y0} \Big|_{x=\frac{\gamma}{2}} &= -\frac{\alpha_1 y}{2} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{k^*} b_{k0} \sin \lambda_k y; \\ \varphi_{x0} \Big|_{y=\frac{1}{2}} &= -\frac{\alpha_1 x}{2} = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{s^*} u_{s0} \sin \mu_s x; & \varphi_{y0} \Big|_{y=\frac{1}{2}} &= -\frac{1}{8} \left(x^2 - \frac{\gamma^2}{4} + 2\alpha_1 \right) = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{s^*} g_{s0} \cos \mu_s x, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\lambda_k = k\pi$; $\mu_s = s\pi/\gamma$; $k^* = (k+1)/2$; $s^* = (s+1)/2$;

$$a_{k0} = -\frac{3}{\lambda_k} \left(\frac{1}{\lambda_k^2} - \alpha_1 \right); \quad b_{k0} = \frac{2\alpha_1}{\lambda_k^2}; \quad u_{s0} = \frac{2\alpha_1}{\gamma} \frac{1}{\mu_s}; \quad g_{s0} = -\frac{1}{\gamma\mu_s} \left(\frac{1}{\mu_s^2} - \alpha_1 \right). \quad (20)$$

Эти невязки должны компенсировать исправляющие функции прогибов $w_{1n}(x, y)$, $w_{2n}(x, y)$ и напряжений $\psi_{1n}(x, y)$, $\psi_{2n}(x, y)$.

Выберем следующие исправляющие функции прогибов:

$$w_{1n} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{k^*} B_{kn} \left(x \operatorname{sh} \lambda_k x - \frac{3}{2} \operatorname{th} \tilde{\lambda}_k \operatorname{ch} \lambda_k x \right) \cos \lambda_k y; \quad (21)$$

$$w_{2n} = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{s^*} D_{sn} \left(y \operatorname{sh} \mu_s y - \frac{1}{2} \operatorname{th} \tilde{\mu}_s \operatorname{ch} \mu_s y \right) \cos \mu_s x. \quad (22)$$

Здесь B_{kn} , D_{sn} — неопределенные коэффициенты; $\tilde{\lambda}_k = \lambda_k \gamma / 2$; $\tilde{\mu}_s = \mu_s / 2$, $n = 1, 2, \dots$ — номер итерации.

Обе функции (21) и (22) являются бигармоническими, а также не дают прогиба на контуре пластины и удовлетворяют условиям отсутствия двух из четырех (попарно) углов поворота заделанных сечений.

Функции напряжений будем определять в виде:

$$\psi_{1n} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{k^*} E_{kn} \operatorname{sh} \beta_k x \sin \lambda_k y; \quad \psi_{2n} = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{s^*} F_{sn} \operatorname{sh} \xi_s y \sin \mu_s x. \quad (23)$$

Здесь E_{kn} , F_{sn} — неопределенные коэффициенты; $\beta_k = \sqrt{\lambda_k^2 + 1/\alpha}$; $\xi_s = \sqrt{\mu_s^2 + 1/\alpha}$.

Функции ψ_{1n} , ψ_{2n} удовлетворяют второму уравнению (12) и, соответственно, тем же граничным условиям, что и w_{1n} , w_{2n} .

Первые две невязки (19) устраняются первой парой исправляющих функций w_{11} и ψ_{11} , при удовлетворении их граничным условиям на кромках $x \pm \gamma/2$, из которых определяются коэффициенты B_{k1} и E_{k1} .

Функции w_{11} и ψ_{11} , в свою очередь, порождают невязку на гранях $y = \pm 1/2$, которую следует разложить в ряд Фурье по $\cos \mu_s x$, переставить знаки суммирования, подставить выражения для коэффициентов B_{k1} , E_{k1} и сложить с соответствующей невязкой от начального многочлена, т. е. привести к виду

$$\Phi_{y11}|_{y=1/2} = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{s*} g_{s1} \cos \mu_s x. \quad (24)$$

Эту и третью невязку (19) будем компенсировать второй парой исправляющих функций w_{21} , ψ_{21} за счет коэффициентов D_{s1} и F_{s1} .

В свою очередь, функции w_{21} и ψ_{21} на кромках $x \pm \gamma/2$ также порождают невязку по углу поворота этих граней $\Phi_{x21}|_{x=\gamma/2}$. Далее процесс наложения исправляющих функций (21) – (23) повторяется. В ходе итерационного процесса все невязки должны, убывая, стремиться к нулю.

Отметим, что в угловых точках пластины

$$M_x(\pm \gamma/2; \pm 1/2) = \alpha_1/2 = h^2/[10(1-\nu)], \quad (25)$$

в то время как для пластины Кирхгофа эти моменты равны нулю.

В качестве примера были получены численные результаты для квадратной пластины при значениях относительной толщины $h = 0,05; 0,1; 0,2; 0,3$ и коэффициенте Пуассона $\nu = 0,3$. В рядах удерживалось до 150 членов. Невязки убывали в геометрической прогрессии со знаменателем не больше $1/3$. Счет прекращался после десяти итераций, при этом вычислялись прогибы, изгибающие моменты M_x и перерезывающие силы Q_x в различных точках пластины. Вблизи контура расчетные точки сгущались, чтобы уточнить влияние концов. На рис. 1 приведены эпюры изгибающих моментов на защемленной грани. Кривая 1 соответствует пластине Кирхгофа, последующие номера присвоены пластинам Рейсснера с относительными толщинами 0,05; 0,1; 0,2; 0,3.

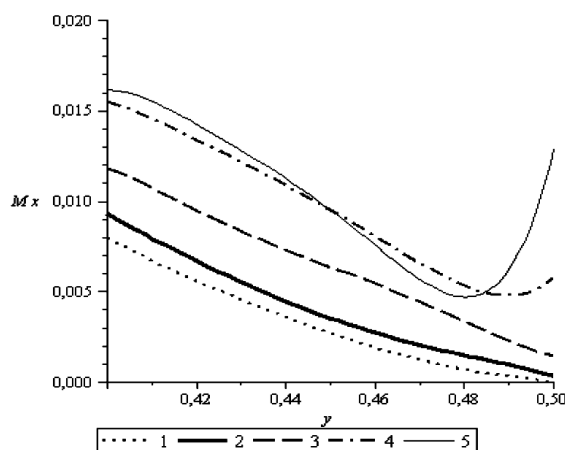


Рис. 1. Эпюры изгибающих моментов M_x/qb^2 в сечении $x \pm \gamma/2$ квадратных пластин Рейсснера

Вычисления показали, что при значениях малых относительных толщин $h \leq 1/20$ результаты для пластин Кирхгофа и Рейсснера практически совпадают. Принципиальное отличие наблюдается вблизи угловых точек контура в изгибающих моментах. Если для пластины Кирхгофа моменты в угловых точках обращаются в нуль, то для пластин Рейсснера они, согласно формуле (25), растут пропорционально квадрату относительной толщины.

Прямоугольная консольная пластина Рейсснера под действием равномерной нагрузки.

Рассмотрим прямоугольную консольную пластину $-\gamma/2 \leq x \leq \gamma/2$, $0 \leq y \leq 1$ (край $y = 0$ защемлен, остальные — свободные).

Граничные условия:

$$w = 0, \varphi_x = 0, \varphi_y = 0 \text{ на грани } y = 0; \quad (26)$$

$$M_y = 0, Q_y = 0, H_{xy} = 0 \text{ на грани } y = 1; \quad (27)$$

$$M_x = 0, Q_x = 0, H_{xy} = 0 \text{ на гранях } x \pm \gamma/2. \quad (28)$$

Углы поворота, моменты и перерезывающие силы определяются формулами (13). Начальный компонент (частное решение уравнения изгиба) возьмем в виде

$$w_0(y) = -\frac{1}{24} [y^4 - 4y^3 + 6(1 - 2\alpha_4)y^2 + 24\alpha_1 y]. \quad (29)$$

Здесь $\alpha_4 = \alpha_2 + \alpha_3$.

Функция w_0 удовлетворяет всем условиям задачи, кроме одного — первого условия (28), т. е. на гранях $x \pm \gamma/2$ порождает невязку в виде изгибающего момента, которую разложим в ряд Фурье по синусам:

$$M_{x0} \Big|_{x=\pm\frac{\gamma}{2}} = -\nu \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + \alpha_3 = \nu \left[\frac{(y-1)^2}{2} - \alpha \right] = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} b_{k0} \sin \lambda_k y, \quad (30)$$

где $b_{k0} = \nu(1 - 2/\lambda_k^2 - 2\alpha)/\lambda_k$, $\lambda_k = k\pi/2$.

Для устранения этой основной невязки и последующих за ней вновь образуемых невязок в граничных условиях будем использовать исправляющие функции прогибов и напряжений следующего вида:

$$\begin{aligned} w_{1n} &= \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (A_{kn} \operatorname{ch} \lambda_k x + B_{kn} x \operatorname{sh} \lambda_k x) \sin \lambda_k y; \\ w_{2n} &= -P_n y + \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s [C_{sn} \operatorname{sh} \mu_s (y-1) + D_{sn} \operatorname{ch} \mu_s (y-1) + \\ &\quad + E_{sn} (y-1) \operatorname{ch} \mu_s (y-1) + F_{sn} (y-1) \operatorname{sh} \mu_s (y-1)] \cos \mu_s x; \\ \psi_{1n} &= \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} G_{kn} \operatorname{sh} \beta_k x \cos \lambda_k y; \quad \psi_{2n} = \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s [R_{sn} \operatorname{sh} \xi_s (y-1) + L_{sn} \operatorname{ch} \xi_s (y-1)] \sin \mu_s x. \end{aligned} \quad (31)$$

Здесь A_{kn} , B_{kn} , P_n , C_{sn} , D_{sn} , E_{sn} , F_{sn} , G_{kn} , R_{sn} , L_{sn} — неопределенные коэффициенты; $\mu_s = 2\pi s/\gamma$; $\beta_k = \sqrt{\lambda_k^2 + 1/\alpha}$; $\xi_s = \sqrt{\mu_s^2 + 1/\alpha}$.

Функции прогибов являются бигармоническими. Функции напряжений удовлетворяют второму фундаментальному уравнению (12). Функции w_{1n} , ψ_{1n} удовлетворяют также первым двум граничным условиям (26) и последним двум условиям (27). Функции w_{2n} , ψ_{2n} удовлетворяют последним двум граничным условиям (28). Слагаемое $P_n y$ в выражении для w_{2n} добавлено для того, чтобы компенсировать свободные члены разложений функций $\operatorname{ch} \lambda_k x$, $x \operatorname{ch} \lambda_k x$ в ряды Фурье по $\cos \mu_s x$ при удовлетворении граничным условиям. Каждая пара функций w_{1n} , ψ_{1n} и w_{2n} , ψ_{2n} позволяет удовлетворить условиям на параллельных гранях $x \pm \gamma/2$ и $y = 0$; 1 соответственно, но порождает невязки на двух других. В ходе итерационного процесса наложения указанных исправляющих функций невязки убывают и в пределе обращаются в нуль.

В качестве примера получены численные результаты на ЭВМ для квадратной пластины с различными значениями относительной толщины: $h = 0,02$; $0,1$; $0,2$; $0,3$; $0,4$ при $\nu = 0,3$. В рядах удерживалось до 150 членов. Процесс сходил в геометрической прогрессии со знаменателем меньше $1/2$. Счет прекращался после десяти итераций, так как невязки были прак-

тически равны нулю. Вычислялись изгибающие моменты M_y в заделке и прогибы противоположной грани.

На рис. 2 приведены эпюры изгибающих моментов M_y в заделке квадратной пластины. Кривая 1 соответствует пластине Кирхгофа. Номера кривых 2 – 6 соответствуют пластинам Рейсснера со значениями относительной толщины $h = 0,02; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$. Расчеты показывают, что при значениях малой относительной толщины $h \leq 1/20$ результаты для пластин Кирхгофа и Рейсснера практически совпадают. Различия принципиального характера проявляются лишь в изгибающих моментах M_y вблизи края заделки. Если для пластин Кирхгофа $M_y \rightarrow -\infty$ при $x \pm \gamma/2$, то для пластин Рейсснера с ростом относительной толщины вблизи края заделки образуется минимум, который смещается к середине заделки и возрастает, после чего $M_y \rightarrow +\infty$. Таким образом, деформации поперечного сдвига, учитываемые в теории Рейсснера, резко изменяют изгибающие моменты, а следовательно, и напряжения вблизи концов заделанного сечения с $-\infty$ на $+\infty$, т. е. здесь имеют место концентраторы напряжений.

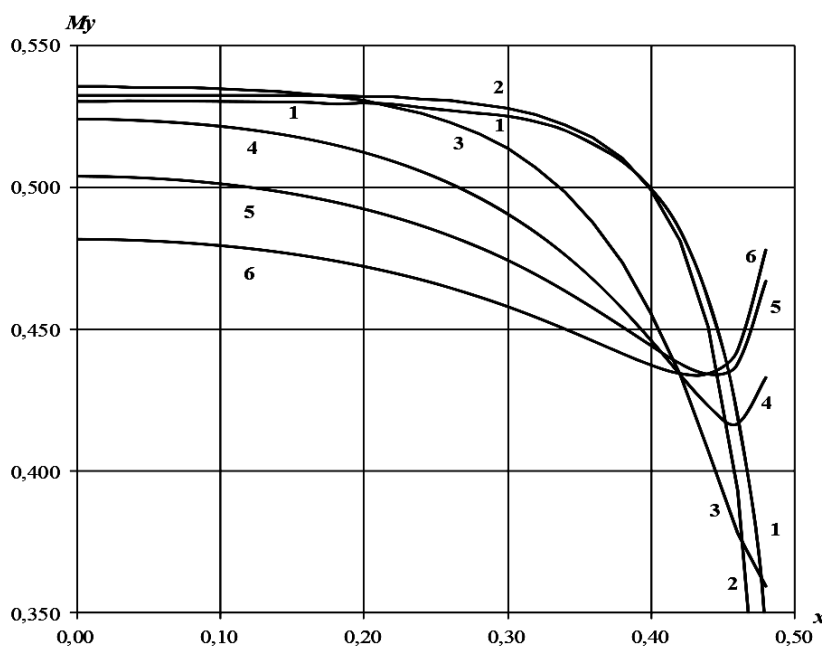


Рис. 2. Изгибающие моменты M_y/qb^2 в заделке квадратных пластин Рейсснера

Полученные результаты дают практическое представление о пределах применимости обычной и сдвиговой теории и могут быть использованы в проектно-конструкторских организациях при выполнении прочностных расчетов, а также для тестирования программ МКЭ и МКР.

Список литературы

1. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. — М.: Физматгиз, 1963. — 635 с.
2. Reissner E. The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates / E. Reissner // J. Appl. Mech. — 1945. — V. 12. — P. A 69–A 77.
3. Васильев В. В. Об асимптотическом методе обоснования теории пластин / В. В. Васильев // Изв. РАН. МТТ. — 1997. — № 3. — С. 150–155.

4. Васильев В. В. К дискуссии по классической теории пластин / В. В. Васильев // Механика твердого тела. — 1995. — № 4. — С. 140–149.
5. Гольденвейзер А. Л. Замечание о статье В. В. Васильева «Об асимптотическом методе обоснования теории пластин» / А. Л. Гольденвейзер // Изв. РАН. МТТ. — 1997. — № 4. — С. 150–158.
6. Жилин П. А. О теориях пластин Пуассона и Кирхгофа с позиций современной теории пластин / П. А. Жилин // Изв. РАН. МТТ. — 1992. — № 3. — С. 48–64.
7. Жилин П. А. О классической теории пластин и преобразовании Кельвина-Тэта / П. А. Жилин // Изв. РАН. МТТ. — 1995. — № 4. — С. 134–140.
8. Жилин П. А. Нелинейная теория тонких стержней / П. А. Жилин // Доклад на XXXIII летней школе «Актуальные проблемы механики». — СПб. — 2005. — С. 266–297.
9. Сухотерин М. В. Метод суперпозиции исправляющих функций в задачах теории пластин / М. В. Сухотерин. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 265 с.
10. Барышников С. О. Расчет на изгиб прямоугольной панели обшивки с центральным ребром жесткости / С. О. Барышников, М. В. Сухотерин, К. О. Ломтева // Вестник Государственного университета имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 59–65.

УДК: 532; 532.526

Ф. Б. Нагиев,
д-р физ.-мат. наук, проф.;

З. О. Исмаилов,
дир. «Kaspian Marin Servisez Limitid»

ОБТЕКАНИЕ СУДНА ПУЗЫРЬКОВОЙ МОРСКОЙ ВОДОЙ

BUBBLE SEAWATER FLOW AROUND SHIP

В отличие от разработанных к настоящему времени методов определения сил, действующих на судно, в статье учитывается наличие мелких газовых пузырьков вблизи судна. Показано, что несмотря на малый суммарный объем, влияние их на динамику жидкости очень велико. Разработана математическая модель, учитывающая взаимодействие судового корпуса с пограничным слоем окружающей его воды с учетом наличия в ней пузырьков газа. Предложена математическая модель и аналитические методы определения параметров обтекающей судна жидкости с учетом наличия в морской воде пузырьков газа. Приведена методика численного решения системы определяющих уравнений и графические результаты вычислений. Построены зависимости компонентов скорости, распределение давления и плотности жидкости в пограничном слое вдоль внешней границы судна для разных значений объемного газосодержания.

Unlike currently developed methods to determine the forces exerted on the vessel, the article is considered the presence of fine gas bubbles near the hull. It is shown that, despite the small total volume, their effect on the dynamics of a liquid is very great. Therefore developed a mathematical model that takes into account interaction between ship hull boundary layer surrounding water, taking into account the presence of gas bubbles in it. The mathematical model and analytical methods for determining the parameters of the fluid flowing around the ship, taking into account the presence of gas bubbles in seawater, are presented. The technique of numerical solution of a system of equations and graphical results of calculations are shown. Dependences of the velocity components, pressure distribution and density of the fluid in the boundary layer along the outer edge of the vessel for different values of gas volume concentration are presented.

Ключевые слова: судно, вода, пузырьки, газ, объемное газосодержание, давление, плотность, скорость, пограничный слой.

Key words: ship, water, bubble, gas, volume concentration, pressure, density, velocity, boundary layer.

Введение

В работах А. М. Басина, Я. И. Войткунского, В. В. Вьюгова, О. И. Гордеева, А. Д. Гофмана, В. Ф. Павленко, Р. Я. Першица, Л. М. Рыжова, В. Г. Соболева, К. К. Федяевского [1] – [9] исследовано действие на судно волнового и ветрового усилий. Разработанные к настоящему времени в этих работах методы определения сил, действующих на судно, основаны на результатах систематических модельных испытаний. Эти эксперименты позволяют с достаточной для обеспечения безопасности судоходства точностью решать задачи теории установившегося движения судна. Однако использование вычисленных по эмпирическим формулам коэффициентов корпусных усилий в уравнения движения судна приводит, согласно исследованиям В. Г. Павленко и В. В. Вьюгова [3] – [6], к расхождениям между расчётными характеристиками и натурными наблюдениями. Следовательно, для решения задач управления судном при маневрировании необходимы специальные методы оценки корпусных усилий, которые позволили бы адекватно описывать произвольное управляемое движение судна.

Основная часть

В толще воды, особенно вблизи поверхности моря, имеется множество мелких пузырьков. Обычно они возникают вследствие волнения и других причин. Несмотря на малый суммарный объем, влияние, которое они оказывают на динамику жидкости, очень велико. Поэтому разработка математических моделей требует аналитических методов определения действующих на судно усилий, основанных на анализе динамического взаимодействия судового корпуса с пограничным слоем окружающей его воды с учетом наличия в ней пузырьков газа. Таким образом, исследования, направленные на анализ происходящих в динамической системе *судно – пузырьковая жидкость* процессов, и их математическое моделирование для имитации поведения реального судна при маневрировании тесно связаны с решением проблемы обеспечения безопасности судоходства. Изучению этих закономерностей, а также разработке на их основе аналитических методов моделирования процессов, характеризующих динамику системы *судно – пузырьковая жидкость*, посвящена данная статья.

Рассмотрим стационарную задачу обтекания судна потоком пузырьковой морской воды со скоростью u_e (e — *external* — внешний). Систему координат введем, как указано на рис. 1: ось Ox направим вдоль горизонтальной оси судна, ось Oy — перпендикулярно к ней, начало координат поместим в нос судна.

Молекулы воды, непосредственно примыкающие к поверхности движущегося в ней судна, прилипают к ней.

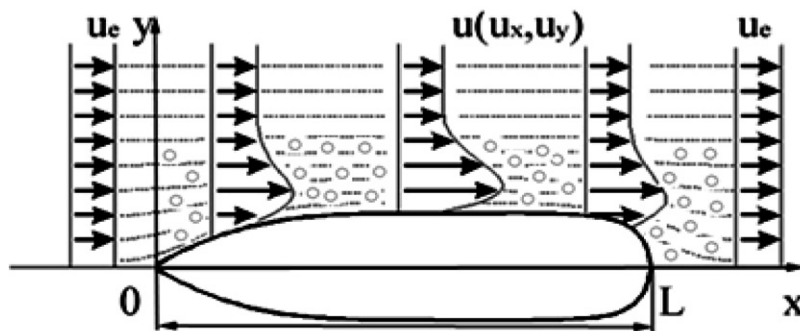


Рис. 1. Схематический процесс обтекания пузырьковой морской водой корпуса судна

В результате вблизи нее формируется переходный пограничный слой, в котором возникает большой градиент скорости [10], [11].

Соппротивление жидкости движению судна определяется характером ее течения в пограничном слое. Параметром этого течения является число Рейнольдса $Re = u_e L / \nu$, где ν — кинематиче-

ская вязкость жидкости (для воды $\nu = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$); L — длина судна. Известно, что на плоской пластине при $Re < 10^5$ жидкость течет ламинарно в виде отдельных несмешивающихся слоев, параллельных плоскости пластины. При $Re > 10^5$ пограничный слой турбулизуется, в нем изменяются структура потока, профиль скоростей и т. п.

Будем рассматривать случай ламинарного обтекания судна. Уравнения Навье – Стокса для сжимаемой вязкой жидкости при отсутствии массовых сил запишем в виде [12]:

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u_x; \quad (1)$$

$$u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta u_y; \quad \Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2. \quad (2)$$

Здесь ρ и p — плотность и давление газожидкостной смеси, u_x и u_y — компоненты скорости.

Объемное содержание пузырьков газа α_2 в морской воде обычно мало, т.е. в единице объема смеси вода – газ $\alpha_2 \sim 1\%$. В этом случае образуется устойчивая пузырьковая структура среды. Тогда уравнение состояния газожидкостной смеси зададим в виде [13]:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{1}{\alpha_{10} + \alpha_{20} \frac{p_0}{p}} \quad \text{или} \quad \frac{p}{p_0} = \frac{\alpha_{20}}{\frac{\rho_0}{\rho} - \alpha_{10}}, \quad (3)$$

где α_{10} и α_{20} — объемные содержания жидкости и газа. Индексом «0» обозначены значения параметров перед судном ($x \leq 0$).

Уравнение (3) получено для баротропной системы. Динамика растворимого газового пузырька с учетом тепло- и массообмена подробно рассмотрена в работах [14], [15].

Использование формулы (3) затруднительно для аналитических исследований из-за нелинейности. Поэтому методом разложения в степенной ряд это уравнение представляется в виде экспоненциальной функции:

$$f(Z) = A + B e^{\alpha Z}; \quad Z = \frac{\alpha_{10} p}{\rho_0}. \quad (4)$$

Выпишем уравнение состояния газожидкостной смеси

$$\frac{\alpha_{10}}{\alpha_{20}} P(Z) = \frac{Z}{1-Z}, \quad (5)$$

представляющее собой дробно-рациональную функцию $\varphi(x) = \frac{a_1 + b_1 x}{a_2 + b_2 x}$, в которой $a_1 = 0$, $a_2 = 1$, $b_1 = 1$, $b_2 = -1$.

Разложив уравнения (4) и (5) в ряд Тейлора до второй степени $Z = \alpha_{10} p / \rho_0$ около значения $Z = \alpha_{10}$, получим:

$$f(Z) = A + B \left[\exp(\alpha Z_0) + \alpha (Z - Z_0) \exp(\alpha Z_0) + \frac{1}{2} \alpha^2 (Z - Z_0)^2 \exp(\alpha Z_0) \right]; \quad (6)$$

$$\frac{\alpha_{10}}{\alpha_{20}} P = \frac{Z}{1-Z} = \left[\frac{Z_0}{1-Z_0} + \frac{Z-Z_0}{(1-Z_0)^2} + \frac{(Z-Z_0)^2}{(1-Z_0)^3} \right]. \quad (7)$$

Приравняв свободные члены и соответствующие члены при одинаковых степенях Z уравнений (6) и (7), получим систему уравнений для определения коэффициентов A , B и α :

$$\frac{Z_0}{1-Z_0} - \frac{Z_0}{(1-Z_0)^2} + \frac{Z_0^2}{(1-Z_0)^3} = A + B \left[\exp(\alpha Z_0) - \alpha Z_0 \exp(\alpha Z_0) + \frac{1}{2} \alpha^2 Z_0^2 \exp(\alpha Z_0) \right];$$

$$\frac{1}{(1-Z_0)^2} - \frac{2Z_0}{(1-Z_0)^3} = B \left[\alpha \exp(\alpha Z_0) - \alpha^2 Z_0 \exp(\alpha Z_0) \right];$$

$$\frac{1}{(1-Z_0)^3} = \frac{B}{2} \alpha^2 \exp(\alpha Z_0),$$

откуда определяем неизвестные коэффициенты (4):

$$A = -1 + \frac{1}{2\alpha_{20}}; \quad B = \frac{1}{2\alpha_{20}} \exp\left(-\frac{2\alpha_{10}}{\alpha_{20}}\right); \quad \alpha = \frac{2}{\alpha_{20}}.$$

Окончательно получаем

$$\frac{p}{p_0} = \frac{1}{2\alpha_{10}} \left\{ \alpha_{10} - \alpha_{20} + \exp\left[\frac{2\alpha_{10}}{\alpha_{20}} \left(\frac{p}{p_0} - 1\right)\right] \right\}. \quad (8)$$

К уравнениям движения (1) и (2) добавим уравнение неразрывности газожидкостной смеси

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

Таким образом, получаем замкнутую систему из четырех уравнений (1), (2), (8) и (9) для определения четырех неизвестных u_x , u_y , p и ρ :

$$\begin{aligned} u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u_x; \\ u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta u_y; \\ \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} &= 0; \\ \frac{p}{p_0} &= \frac{1}{2\alpha_{10}} \left\{ \alpha_{10} - \alpha_{20} + \exp\left[\frac{2\alpha_{10}}{\alpha_{20}} \left(\frac{p}{p_0} - 1\right)\right] \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для полного определения математической модели течения зададим граничные условия. Пусть уравнение корпуса судна имеет вид $y = \pm k\sqrt{x}$. Коэффициент k характеризует кривизну корпуса. Тогда граничные условия для скорости могут выглядеть следующим образом. На стенках судна ставится условие *прилипания*, согласно которому нормальная и касательная скорости на стенках равны нулю:

$$y = \pm k\sqrt{x} \quad (u_x = 0; u_y = 0). \quad (11)$$

При этом равенство $u_x = 0$ означает отсутствие скольжения, а условие $u_y = 0$ отражает тот факт, что стенка канала непроницаема для жидкости.

Задается скорость набегающего потока:

– перед судном:

$$x \leq 0 : u_x = u_e, u_y = 0; \quad (12)$$

– за судном:

$$x \geq L : \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0, u_y = 0. \quad (13)$$

Это означает, что за судном течение близко к плоско-параллельному ($u_y = 0$) и его характеристики не меняются: $\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$, т.е. $u_x(x, y) \rightarrow u$ при $y \rightarrow \infty$.

Введем безразмерные переменные:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L} \sqrt{\text{Re}}; \quad U_x = \frac{u_x}{u_e}; \quad U_y = \frac{u_y}{u_e} \sqrt{\text{Re}}; \quad P = \frac{p}{\rho_0 u_e^2}; \quad R = \frac{\rho}{\rho_0}; \quad \tau = \frac{t u_e}{L}; \quad U = \frac{u}{u_e}.$$

Из уравнения неразрывности (9) получаем

$$\frac{\partial(RU_x)}{\partial X} + \frac{\partial(RU_y)}{\partial Y} = 0. \quad (14)$$

Уравнение движения преобразуется к виду:

– в направлении оси Ox

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial X} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial Y} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_x}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial Y^2}. \quad (15)$$

– в направлении оси Oy

$$\frac{1}{Re} \left(U_x \frac{\partial U_y}{\partial X} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial Y} \right) = -\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \cdot \left(\frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_y}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial Y^2} \right). \quad (16)$$

Уравнение состояния газожидкостной смеси преобразуется к виду

$$P = \frac{1}{2\alpha_{10}} \left\{ \alpha_{10} - \alpha_{20} + \exp \left[\frac{2\alpha_{10}}{\alpha_{20}} (R - 1) \right] \right\}. \quad (17)$$

Оценим число Рейнольдса $Re = u_e L / \nu$ для потока воды со скоростью 20 м/с судна длиной 50 м: $Re \approx 20 \cdot 50 / 10^{-6} = 10^9$. Для значений $Re \geq 10^9$ система уравнений упрощается и принимает вид:

$$\frac{\partial(RU_x)}{\partial X} + \frac{\partial(RU_y)}{\partial Y} = 0; \quad (18)$$

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial X} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial Y} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial Y^2}; \quad (19)$$

$$\frac{\partial P}{\partial Y} = 0; \quad (20)$$

$$\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{1}{\alpha_{20}} \exp \left[\frac{2\alpha_{10}}{\alpha_{20}} (R - 1) \right] \cdot \frac{\partial R}{\partial X}. \quad (21)$$

Из уравнения (20) следует, что давление p зависит только от одной переменной (продольной) X , а следовательно, согласно (17), плотность R тоже зависит только от X . Тогда система уравнений (18) – (21) приобретает вид:

$$\frac{\partial(RU_x)}{\partial X} + \frac{\partial(RU_y)}{\partial Y} = 0; \quad (22)$$

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial X} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial Y} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{dP}{dX} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial Y^2}; \quad (23)$$

$$\frac{dP}{dX} = \frac{1}{\alpha_{20}} \exp \left[\frac{2\alpha_{10}}{\alpha_{20}} (R - 1) \right] \cdot \frac{dR}{dX}. \quad (24)$$

Похожую задачу о моделировании обтекания тонкой пластинки потоком вязкой, но несжимаемой среды, решал Блазиус [16], пренебрегая при решении для области пограничного слоя массовыми силами и полагая $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$, так как во внешнем слое давление постоянно.

Полученная система уравнений (22) – (24) представляется незамкнутой, так как число неизвестных R, U_x, U_y, p в ней на единицу превышает число уравнений. Для преодоления проблемы незамкнутости системы уравнений Прандтль предложил считать, что внешняя граница пограничного слоя обтекается жидкостью так же, как идеальная жидкость обтекала бы саму поверхность данного тела. Следовательно, за распределение скорости вдоль внешней границы пограничного слоя можно принять распределение скорости вдоль поверхности судна при обтекании его идеальной жидкостью. Примем также на внешней границе жидкость несжимаемой. Тогда можно продифференцировать интеграл Бернулли, записанный для линии тока на внешней границе пограничного слоя:

$$p(x) + \frac{\rho u^2(x)}{2} = \text{const.}$$

Получим $\frac{dP(X)}{dX} = -U(X) \frac{dU(X)}{dX}$.

Таким образом, получено уравнение для градиента давления, делающее систему уравнений замкнутой. Величина $U(X)$ входит в граничное условие задачи: при $Y \rightarrow \infty U_x(X, Y) \rightarrow U(X)$. Поэтому предполагается, что величина $U(X)$ задана с учетом воздействия ветра и морской волны. Тогда система уравнений (22) – (24) с учетом интеграла Бернулли и уравнения (17) запишется в виде:

$$\frac{\partial(RU_x)}{\partial X} + \frac{\partial(RU_y)}{\partial Y} = 0; \quad (25)$$

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial X} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial Y} = \frac{1}{R} \cdot U \frac{dU}{dX} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial Y^2}; \quad (26)$$

$$R = \frac{1}{\alpha_{10} + 2\alpha_{20} / (3 - U^2)}. \quad (27)$$

Пусть с учетом воздействия ветра и морской волны скорость частиц воды вне пограничного слоя у корпуса судна задается в виде

$$U(X) = 1 + Ae^{-BX^2} \cos \Omega X. \quad (28)$$

Параметры, входящие в зависимость (28), примем $A = 0,5$; $B = 0,2$; $\Omega = 5$. У носа судна скорость жидкости максимальна и составляет $U = 1,5$, за судном профиль скоростей выравнивается и стремится к значению перед судном $u \rightarrow u_e$ или $U \rightarrow 1$.

На рис. 2 приведено распределение плотности газожидкостной смеси с объемным газосодержанием $\alpha_{20} = 0,05$. Поведение кривых на рисунке показывает, что при убывании скорости потока давление и плотность жидкости возрастают и наоборот, чем меньше скорость, тем выше давление и плотность. На рис. 3 приведен профиль давления жидкости во внешней границе судна для разных значений газосодержания: $\alpha_{20} = 0,1$ и $\alpha_{20} = 0,5$. Видно, что чем больше газосодержание, тем выше сжимаемость жидкости, и соответственно, меньше давление.

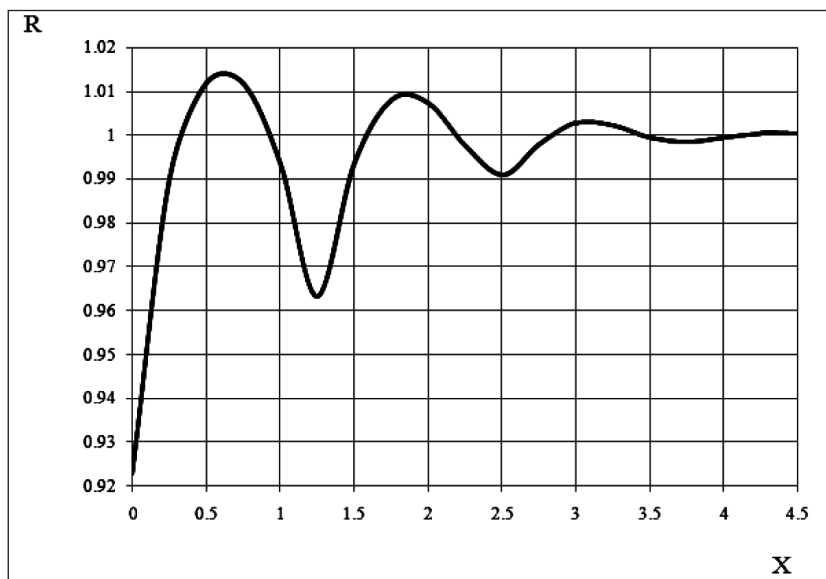


Рис. 2. Распределение плотности вдоль внешней границы судна

Для определения продольной и поперечной компоненты скорости частиц жидкости исключим плотность из уравнений (25) и (26). Продифференцируем R в уравнении (27) по X :

$$\frac{dR}{dX} = - \frac{4\alpha_{20}}{\left[\alpha_{10} + 2\alpha_{20} / (3 - U^2)\right]^2} \cdot \frac{U}{(3 - U)^2} \cdot \frac{dU}{dX}. \quad (29)$$

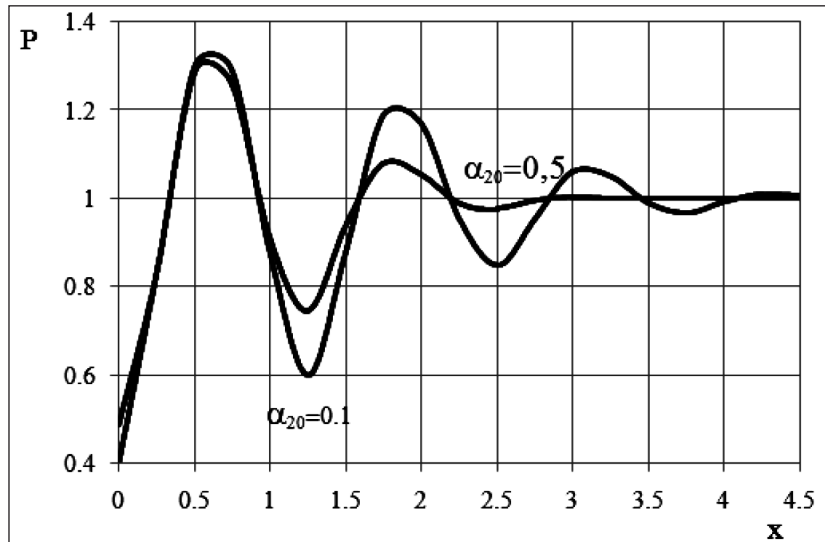


Рис. 3. Распределение давления жидкости вдоль внешней границы судна для разных значений газосодержания

Приведем систему уравнений (25) и (26) к виду, удобному для интегрирования:

$$U_x \frac{dR}{dX} + R \frac{\partial U_x}{\partial X} + R \frac{\partial U_y}{\partial Y} = 0; \quad (30)$$

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial X} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial Y} = \frac{1}{R} \cdot U \frac{dU}{dX} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial Y^2}. \quad (31)$$

Подставив (29) и (27) в (30), (31), получим систему двух уравнений с частными производными относительно неизвестных U_x и U_y . Система уравнений решалась численно методом конечных разностей. В общем случае из уравнения неразрывности (25) следует, что существует такая функция $\psi(X, Y)$, что $RU_x = \frac{\partial \psi}{\partial Y}$; $RU_y = -\frac{\partial \psi}{\partial X}$.

Таким образом, на основании уравнения неразрывности получим, что компоненты скорости RU_x и RU_y выражаются через функцию $\psi(X, Y)$ в виде

$$\begin{cases} U_x = \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial Y}; \\ U_y = -\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial X}. \end{cases} \quad (32)$$

Подставляя эти равенства в уравнение (31), получим

$$\frac{\partial^3 \psi}{\partial Y^3} - \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial Y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial X \partial Y} + \frac{1}{R^2} \frac{dR}{dX} \left(\frac{\partial \psi}{\partial Y} \right)^2 + \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial X} \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = -U \frac{dU}{dX}. \quad (33)$$

Данное уравнение решалось численно конечно-разностным методом путем разбиения отрезка поперек корпуса судна на отрезки шагом ΔH . В результате разбиения уравнение в частных производных (33) переходит в систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Эта система решалась также численно методом Рунге – Кутты. В результате из соотношений (32) определились продольная и поперечная компоненты скорости частиц жидкости.

На рис. 4 и 5 приведены графики распределения продольной и поперечной компоненты скорости в фиксированном сечении $X = 0,2$. Размерная поперечная компонента скорости $u_y = u_e U_y / \sqrt{\text{Re}}$ по величине значительно меньше продольной: $u_x = u_c U_x$.

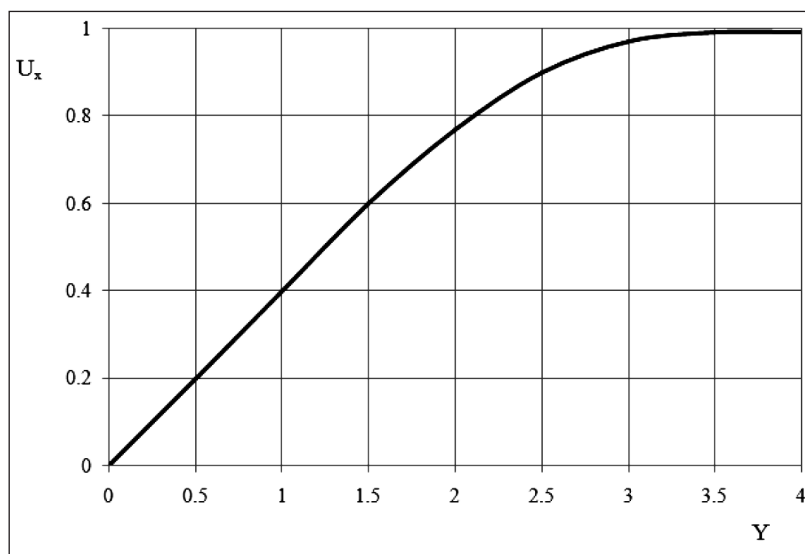


Рис. 4. График распределения продольной компоненты скорости

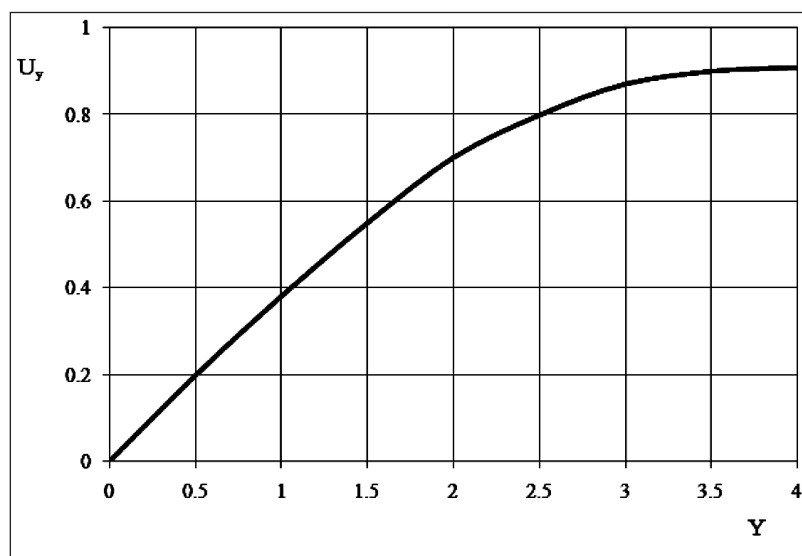


Рис. 5. График распределения поперечной компоненты скорости

Выводы

1. Выведена система уравнений, позволяющая определить профили частиц газожидкостной среды, распределение давления и плотности жидкости вдоль внешней границы судна при различных значениях объемной концентрации газа. В частном случае отсутствия газа полученные в статье расчетные зависимости совпали с известными в литературе соответствующими результатами других авторов [1], [6]. Наличие газа приводит к увеличению сжимаемости жидкости, что способствует уменьшению значений давления вокруг корпуса судна.

2. Предложенная система уравнений показывает, что если на каком-либо участке скорость движения жидкости увеличивается, то для выполнения условия сохранения массы среды должна понизиться плотность пузырьковой смеси и в соответствии с расчетами также должно понизиться

давление. Следовательно, во время движения судна вокруг него происходит падение плотности жидкости и давления. Чем больше объемное газосодержание, тем меньше плотность и давление смеси. Влияние газовых пузырьков на уменьшение давления и плотности смеси усиливается при увеличении скорости потока. Как известно, падение давления является причиной скоростного проседания судна: чем больше скорость потока, движущегося вдоль корпуса судна, тем больше проявление эффекта падения давления и, соответственно, значительнее проседание судна. Наличие пузырьков вокруг корпуса судна усиливает этот эффект ввиду падения плотности водовоздушной смеси.

Список литературы

1. Басин А. М. Гидродинамика судна / А. М. Басин, В. Н. Анфимов. — Л.: Речной транспорт. — 1961. — 684 с.
2. Войткунский Я. И. Справочник по теории корабля. — В 3 т. — Т. 3. / Я. И. Войткунский и др. — Л.: Судостроение, 1985. — 544 с.
3. Вьюгов В. В. Управляемость водоизмещающих речных судов / В. В. Вьюгов. — Новосибирск: НГАВТ, 1999. — 200 с.
4. Гордеев О. И. Математическое моделирование движения речных судов для судоводительских тренажеров (грузовые суда и толкаемые составы) / О. И. Гордеев. — Новосибирск: НГАВТ, 1996. — 178 с.
5. Гофман А. Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания / А. Д. Гофман. — Л.: Судостроение, 1971. — 256 с.
6. Павленко Г. Е. Сопротивление воды движению судов / Г. Е. Павленко. — М.: Морской транспорт, 1956. — 507 с.
7. Войткунский Я. И. Справочник по теории корабля / Я. И. Войткунский, Р. Я. Першиц, И. А. Титов. — Л.: Судостроительная промышленность, 1960. — 688 с.
8. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном / Р. Я. Першиц. — Л.: Судостроение, 1983. — 272 с.
9. Рыжов Л. М. Маневренность речных судов и составов / Л. М. Рыжов, Н. Ф. Соларев. — М.: Транспорт, 1967. — 140 с.
10. Пат. 85442 Российская Федерация, МПК Н 04 В63Н9/08, парусное судно [Текст] / Никонов А. А., Витин И. М.; заявитель и патентообладатель А. А. Никонов, И. М. Витин. — № 2009107991/22; Заявлено 06.03.2009; Опубл. 10.08.2009.
11. Байбаков В. И. Парус, море и свежий ветер [Электронный ресурс]: Сопротивление воды движению судна. — Режим доступа: <http://parusa.narod.ru/bib/books/bayb/7.htm>.
12. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. — Т. 1. — М.: Наука, 1970. — 492 с.
13. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. — М.: Наука, 1978.
14. Нагиев Ф. Б. Нелинейные колебания растворимых газовых пузырьков в жидкости / Ф. Б. Нагиев // Изв. АН Аз. ССР. Серия физ.-техн. и матем. наук. — 1985. — № 1. — С. 136–140.
15. Хабеев Н. С. Динамика растворимых газовых пузырьков / Н. С. Хабеев, Ф. Б. Нагиев // Известия АН СССР. Механика жидкостей и газов. — 1985. — № 6. — С. 52–59.
16. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1978. — 736 с.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОЙ УТИЛИЗАЦИИ СУДОВ

IDENTIFICATION OF THE MATERIAL TO MEET THE REQUIREMENTS OF SAFE SHIP RECYCLING

В статье рассмотрены основные особенности определения типов и количества материалов на борту вновь строящегося судна, которые должны содержаться в Учетной записи опасных материалов (УЗОМ) в соответствии с Гонконгской международной конвенцией о безопасной и экологически рациональной утилизации судов и Правилами Европейского союза по утилизации судов. При разработке УЗОМ важной задачей является необходимость осуществления проверки на присутствие материалов, определенных нормативными документами. Решение данной задачи возможно с помощью введения декларации материалов, в которой поставщики предоставят данные о материалах, поставляемых на судно. При оформлении УЗОМ необходимо составить список мест расположения опасных материалов на судне, при составлении которого возможно использование различных подходов, рассмотренных авторами. Кроме того, отмечена методология заполнения УЗОМ.

The article describes the main features of the definition of the types and quantities of materials for new ship, which must be listed on the Inventory of hazardous materials in accordance with the Hong Kong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships and European Union regulations on ship recycling. In the development of the Inventory of hazardous materials important task is the need for testing for the presence of materials, certain regulations. The solution to this problem is possible by introducing a declaration of materials in which suppliers will provide data on the materials delivered to the ship. When making the Inventory of hazardous materials necessary to make a list of the locations of hazardous materials on board. In the preparation of which it is possible to use different approaches, the authors considered. In addition, marked methodology of filling the Inventory of hazardous materials.

Ключевые слова: утилизация судов, экологическая безопасность, учетная запись опасных материалов, Гонконгская международная конвенция о безопасной и экологически рациональной утилизации судов.

Key words: recycling of ships, ecological safety, Inventory of hazardous materials, Hong Kong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships and European Union regulations on ship recycling.

В ПРОЦЕССЕ утилизации судов, в связи с содержащимися в корпусе списанных судов опасными материалами, остро встают вопросы, касающиеся обеспечения жизни и здоровья рабочих и защиты окружающей среды. Суда, особенно построенные до 1980 г., содержат множество токсичных и опасных веществ и материалов, которые могут привести к гибели людей или вызвать заболевания, а также оказывать длительное неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Несмотря на то, что на данный момент использование многих вредных материалов в судостроении ограничено или запрещено, построенные 20 – 30 лет назад суда по-прежнему содержат эти материалы. Список токсичных и опасных веществ и материалов, которые могут находиться на судах, направляемых на переработку, обычно включает асбест, полихлордифенилы, поливинилхлориды, тяжелые металлы, полициклические ароматические углеводороды, различные виды масла и шлам, а также трюмные, балластные воды [1].

Для обеспечения безопасности процесса утилизации судов 15 мая 2009 г. была принята Гонконгская международная конвенция о безопасной и экологически рациональной утилизации су-

дов (далее — Конвенция) и с 1 января 2014 г. вступили в силу Правила Европейского союза по утилизации судов (далее — Правила ЕС) [2], [3]. Положения Конвенции и Правил ЕС требуют наличия на борту судна учетной записи опасных материалов (УЗОМ) [4], которая необходима для определения нахождения опасных материалов на борту судна с целью защиты здоровья и обеспечения безопасности, а также предотвращения экологического загрязнения на предприятиях по утилизации судов. Эта информация будет использоваться на предприятии по утилизации для решения вопросов управления материалами, образующимися в процессе утилизации судна [5] – [7], поэтому важно максимально точно идентифицировать типы и количество материалов, которые должны быть указаны в УЗОМ.

В Резолюции МЕРС.197(62) [11] (далее — Резолюция) предлагается стандартный формат УЗОМ, который состоит из трех частей [8], [9]:

- ч. I «Материалы, содержащиеся в конструкции судна или оборудовании»;
- ч. II «Отходы, образованные в процессе эксплуатации»;
- ч. III «Запасы».

Прил. 1 Резолюции «Элементы, которые должны быть перечислены в Учетной записи опасных материалов», содержит информацию об опасных материалах, которые могут быть идентифицированы на борту судна. Материалы, изложенные в прил. 1, должны быть приведены в УЗОМ. Каждый элемент прил. 1 Резолюции классифицирован как табл. А, табл. В, табл. С или табл. D согласно его свойствам.

- 1. Табл. А включает материалы, приведенные в прил. 1 Конвенции.
- 2. Табл. В включает материалы, приведенные в прил. 2 Конвенции.
- 3. Табл. С (потенциально опасные элементы) включает элементы, потенциально опасные для среды и человеческого здоровья на предприятии по утилизации.
- 4. Табл. D (регулярные потребляемые товары, потенциально содержащие опасные материалы) включает товары, которые не являются неотъемлемой частью судна и вряд ли будут демонтированы или обработаны на предприятии по утилизации.

Табл. А и В соответствуют ч. I «Материалы, содержащиеся в конструкции судна или оборудовании» УЗОМ, табл. С соответствует ч. II «Отходы, образованные в процессе эксплуатации» УЗОМ, табл. D – ч. III «Запасы» УЗОМ.

В России для судов с классом Российского речного регистра для возможности назначения судну уровня экологической безопасности ЭКО1, ЭКО2 или ЭКО3 действует Руководство Р.029-2010 «Требования к судам повышенной экологической безопасности» [13], согласно которому при проведении освидетельствования судов с целью присвоения им символов ЭКО1, ЭКО2 или ЭКО3 судно должно иметь одобренный «Зеленый паспорт» в соответствии с Резолюцией А.962(23) «Руководство ИМО по утилизации судов» [10], а также Удостоверение о соответствии требованиям этой резолюции.

Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства содержат требования по оборудованию судов на соответствие знакам ЕСО и ЕСО-S в символе класса, в соответствии с которыми для присвоения этих символов в классе судно также должно иметь одобренный «Зеленый паспорт», в соответствии с Резолюцией А.962(23) «Руководство ИМО по утилизации судов», и содержать следующую информацию [10]:

- сведения о судне, такие как название государства флага, опознавательный номер судна, название и тип судна, порт регистрации, судовладелец и его адрес;
- ведомость материалов, известных как потенциально опасные, содержащую местоположение и приблизительное количество/объем каждого материала на судне.

Однако эти документы не в полной мере отвечают современному состоянию уровня безопасности при утилизации судов на предприятиях. Поэтому для достижения целей безопасной утилизации судов в России необходимо разработать обязательные требования, которые принимают во внимание процесс разделки судна в течение всего периода его существования. Например, такие требования могут быть представлены в формате Правил безопасной утилизации судов (да-

лее — Правила), которые должны распространяться на новые и существующие, модернизируемые и переоборудуемые суда [4]. Ключевым элементом Правил должен стать обязательный учет опасных материалов на судне.

Проанализировав существующие в настоящее время документы, регламентирующие вопросы безопасности при утилизации судов, можно сделать вывод о том, что учет опасных материалов необходимо вести, основываясь на нормах Конвенции, т. е. применять УЗОМ, так как Конвенция является итоговым документом, имеющим юридическую силу нормативного режима с целью обеспечения безопасной утилизации судов. Таким образом, на судне должна быть УЗОМ, содержащая информацию о имеющихся вредных материалах. Для новых судов УЗОМ должна разрабатываться на стадии проектирования и строительства, а для существующих судов — судовладельцем.

Данная статья посвящена вопросу подготовки ч. I УЗОМ для новых судов. В табл. 1 – 3 приведен стандартный формат ч. I «Опасные материалы, содержащиеся в конструкции и оборудовании судна» УЗОМ, структурированной по разделам: «Окраска и покрытия» (I-1), «Оборудование и механизмы» (I-2), «Элементы корпуса» (I-3) [11].

Таблица 1

I-1. Окраска и покрытия, содержащие материалы, указанные в табл. А и В

№ п/п.	Применение краски	Название краски	Расположение	Материалы (классификация в прил. 1 Конвенции)	Приблизительное количество	Комментарии

Таблица 2

I-2. Оборудование и механизмы, содержащие материалы, указанные в табл. А и В

№ п/п.	Наименование оборудования и механизма	Расположение	Материалы (классификация в прил. 1 Конвенции)	Части, где используются	Приблизительное количество	Комментарии

Таблица 3

I-3. Элементы корпуса, содержащие материалы, указанные в табл. А и В

№ п/п.	Название структурного элемента	Расположение	Материалы (классификация в прил. 1 Конвенции)	Части, где используются	Приблизительное количество	Комментарии

Ч. I УЗОМ для новых судов может быть разработана по следующим трём этапам:

- сбор информации об опасных материалах;
- использование информации об опасных материалах;
- подготовка УЗОМ (заполнением стандартного формата).

Для осуществления возможности разработки УЗОМ в России важно адаптировать ее содержание под национальные нормативные документы. Так, в первую очередь, необходимо определить, какие элементы должны быть включены в разд. I-1 – I-3 и как классифицировать их по районам судна.

Так как для новых судов УЗОМ должна разрабатываться на стадии проектирования, для определения списка мест расположения опасных материалов рационально использовать нормативные документы, применяемые проектантскими на этой стадии. В качестве такого документа может выступить ОСТ 5Р.0206-2002 «Нагрузка масс гражданских судов. Классификация элементов нагрузки» [12]. Тогда первичная классификация мест расположения опасных материалов может быть представлена в соответствии с разделами стандарта:

- корпус;
- устройства судовые;
- системы;
- установки энергетические, главная и вспомогательные;
- электроэнергетическая система, внутрисудовые связь и управление;
- вооружение;
- съемное оборудование;
- снабжение, имущество.

Дальнейшую классификацию в УЗОМ также целесообразно производить в соответствии с указанным ОСТом, в котором разделы подразделяются на группы, группы — на подгруппы, а подгруппы — на статьи. Однако очевидно, что в большинстве случаев возможно отказаться от выделения тех или иных подразделений, сохраняя общую структуру (например, в группу 0101 «Корпус металлический») включаются только металлические элементы без окраски, грунтовки, зашивки и т. п., следовательно, в ней не могут находиться опасные вещества, выделяемые Конвенцией). Такой подход позволит использовать данные для заполнения учётной записи по отработанной в проектировании методологии, использующей документ, рассчитываемый с высокой точностью. Однако нельзя считать, что структура ОСТ 5Р.0206-2002 [12] является единственной альтернативой определения мест расположения опасных материалов. За основу может быть принята используемая в судостроении общая компоновка в корпусе, надстройках и рубках всех помещений, предназначенных для размещения на судне главных и вспомогательных механизмов, судового оборудования, запасов, перевозимых грузов, экипажа и пассажиров, а также всех служебных, бытовых, хозяйственных и санитарных помещений. Т. е. первый уровень классификации — корпус, надстройка. Второй уровень классификации, например для корпуса, будет включать палубы, платформы, отсеки, второе дно и т. д.

Вне зависимости от подхода к идентификации элементов, содержащих опасные материалы и места их расположения, необходимо учитывать приведенную в Резолюции МЕРС.197(62) методологию заполнения УЗОМ. Например, при наличии нескольких одинаковых механизмов или оборудования в одном отсеке в УЗОМ заносится их наименование с отметкой количества; стандартные детали массового производства (болты, гайки, клапаны и т. п.) указываются без привязки к конкретному оборудованию, механизму и месту расположения. Пример заполнения в соответствии с рекомендациями табл. I-2 стандартного формата ч. I приведен в табл. 4 [11].

Таблица 4

Пример заполнения табл. I-2 стандартного формата ч. I

№ п/п.	Наименование оборудования или механизма	Расположение	Материалы (классификация в прил. 1 Конвенции)	Части, где используются	Приблизительное количество		Комментарии
	Главный двигатель	Машинное отделение	Свинец	Втулка поршневого кольца	0,75	кг	—
			Ртуть	Термометр для измерения температуры наддувочного воздуха	0,01	кг	—

Таблица 4
(Окончание)

	Дизель-генератор (× 3)	Машинное отделение	Ртуть	Термометр	0,03	–	–
	Панель управления	Пост управления двигателем	Кадмий	Покрытие корпуса	0,02	кг	–
			Ртуть	Датчик температуры	< 0,01	кг	Менее чем 0,01 кг

Важным этапом заполнения УЗОМ является идентификация материалов, находящихся на борту судна в соответствии с перечнем, определенным в табл. А, В прил. Резолюции.

Во время разработки ч. I УЗОМ наличие материалов, указанных в табл. А, должно быть проверено и подтверждено в документации на проект судна, количество и местоположение этих материалов должно быть указано в ч. I УЗОМ. Пример «Декларации материалов» дан в табл. 5.

Таблица 5

Форма «Декларации материалов»

Идентификационный номер декларации материалов		Дата декларации	
Идентификационный номер декларации поставщика о соответствии			
Название Компании		Название подразделения	
Адрес			
Контактное лицо		Телефон	
Email		Факс	
Примечание			

<Информация о продукте>

Наименование продукта	Номер продукта	Поставленная единица		Информация о продукте
		количество	Ед. измерения	

<Информация о материалах>

	Ед.изм.
1	

Информация о материалах показывает количество опасных материалов, содержащихся в продукте (ед. изм.: часть, кг, м, М², м³ и т.д.).

Таблица 5
(Окончание)

Тип таблицы	Наименование материала	Пороговый уровень	Существующий уровень выше порогового?	Если да, количество материала	Если да, единица измерения	Если да, информация о том, где он используется
			Да / Нет			
Таблица А (материалы, указанные в табл. А)	Асбест	Нет порогового уровня				
	Полихлорированные бифенилы (PCBs)	50 мг/кг				
	Вещества, разрушающие озон: CFCs	Нет порогового уровня				
	Галогены					
	Полностью галогенизи- рованные CFCs					
	Четыреххлористый углерод					
	Трихлорэтан (метил хлороформ)					
	Гидрохлорфторуглероды					
	Гидробромфторуглероды					
	Бромистый метил					
	Бромхлорметан					
	Предохраняющие от обрастания систе- мы, содержащие оловоорганические компоненты, такие как биоцид	2,500 мг олова/кг				
Таблица В (материалы, указанные в табл. В)	Кадмий и соединения кадмия	100 мг/кг				
	Шестивалентный хром и соединения шестивалентного хрома	1,000 мг/кг				
	Свинец и соединения свинца	1,000 мг/кг				
	Ртуть и соединения ртути	1,000 мг/кг				
	Полибромированные бифенилы (PBBs)	1,000 мг/кг				
	Полибромированные дифенилэфиры (PBDEs)	1,000 мг/кг				
	Полихлорированные нафталины (более чем с тремя атомами хлора)	Нет порогового уровня				
	Радиоактивные вещества	Нет порогового уровня				
	Некоторые хлорированные парафины с короткой цепью (алканы, C10-C13, хлор)	1 %				

Если материалы, указанные в табл. В, присутствуют в продуктах выше пороговых уровней, предусмотренных в этой таблице, количество и местоположении продуктов, и содержание материалов, присутствующих в них, должны быть указаны в ч. I УЗОМ.

Проверка на присутствие материалов, указанных в табл. А, В, должна быть основана на «Декларации материалов» (далее — Декларация), предоставляемой поставщиками в системе поставок судостроения (например, поставщиками оборудования, снабжения, инвентаря, материалов). Иными словами, поставщики должны объявить, присутствуют ли опасные материалы, приведенные в табл. А, В Декларации, в концентрациях выше пороговых уровней, определенных для каждого «гомогенного материала» в продукте. Таким образом, в Декларации необходимо отразить контактные данные поставщика, информацию о продукте, информацию о материалах, включающую его наименование (согласно табл. А и В Конвенции), значения порогового и фактического уровней материалов в продукте, их сопоставление и в случае превышения фактического над пороговым уровнем указать местонахождение материала на судне.

В Резолюции МЕРС.197(62) указано, что гомогенный материал означает материал однородного состава, поэтому он не может быть механически разделен на различные материалы, т. е. материалы не могут, в принципе, быть отделены такими технологическими операциями, как отвинчивание, вырезка, дробление, размалывание и абразивные процессы.

На рис. 1 приведен пример четырех гомогенных материалов, которые составляют кабель. В этом случае оболочка, изоляция, диэлектрик и проводник — все индивидуальные гомогенные материалы. Таким образом, для составления объективного перечня опасных материалов на борту судна и подготовки УЗОМ необходимо требовать от поставщиков, вовлеченных в поставку и покупку материалов и товаров, от сырья до конечного продукта (машины, оборудование, материалы и примененные покрытия на борту судна) Декларацию. Соответственно в сбор данных по опасным материалам может быть вовлечена вся система поставок судостроения (рис. 2) [11].

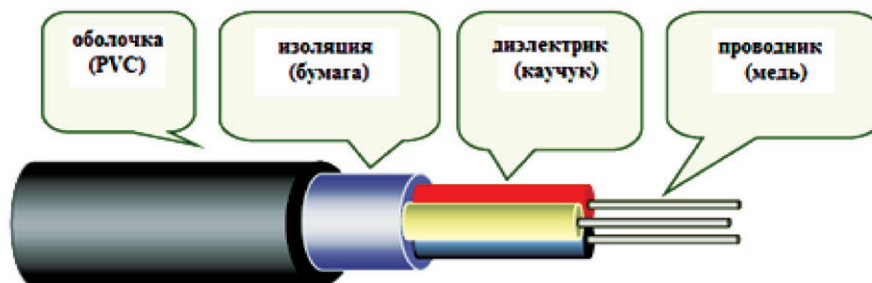


Рис. 1. Пример гомогенных материалов (кабель)

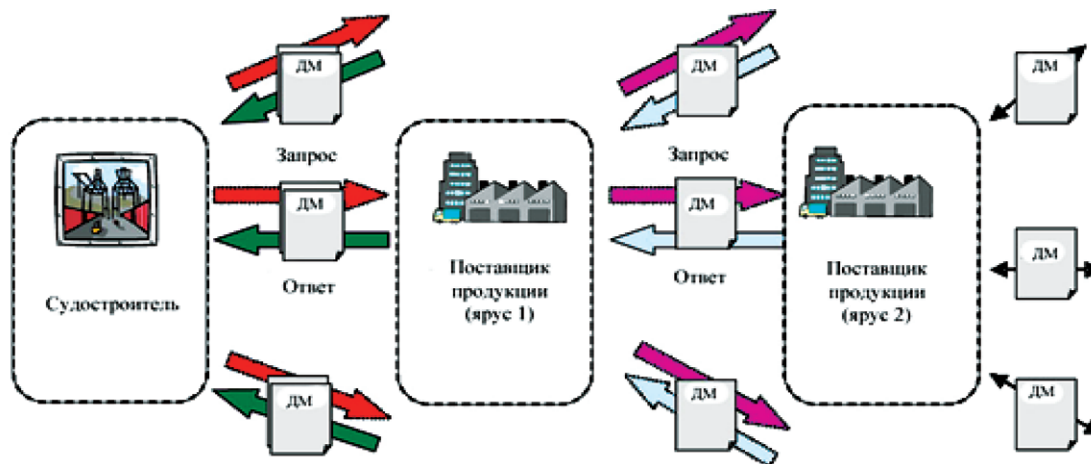


Рис. 2. Процесс сбора данных об опасных материалах, показывающий вовлеченные системы поставок

Очевидно, что для идентификации материалов для вновь строящегося судна необходимо создать систему сбора данных об опасных материалах на этапе проектирования судна, что потребует принятия норм и правил, регламентирующих взаимосвязь между производителем, заводом-строителем и предприятием по утилизации судна. В Российской Федерации организацией, в рамках правового поля которой может быть реализована данная система для обеспечения безопасности при утилизации судов, является Российский речной регистр.

Список литературы

1. Генеральная Ассамблея ООН. A/HRC/12/26. 15 июля 2009. Доклад Специального докладчика Окечкуву Ибеану по вопросу о неблагоприятных последствиях незаконных перевозок и захоронения токсичных и опасных продуктов и отходов для осуществления прав человека. — Режим доступа: http://www2.ohchr.org/english/bodies/hrcouncil/docs/12session/A.HRC.12.26_ru.pdf.
2. Гредасова И. Б. Анализ требований безопасности при утилизации судов / И. Б. Гредасова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 185–188.
3. Regulation (EU) No 1257/2013 of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on ship recycling and amending Regulation (EC) No 1013/2006 and Directive 2009/16/EC. — Режим доступа: http://www.safety4sea.com/images/media/pdf/EU_Ship-Recycling-Regulation.pdf.
4. Наумов В. С. Перспектива нормативно-правового регулирования безопасной утилизации судов / В. С. Наумов, И. Б. Кочнева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4(26). — С. 32–37.
5. Resolution MEPC.196(62)-2011. Guidelines for the Development of the Ship Recycling Plan. — Режим доступа: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/RESOLUTION%20MEPC.196\(62\).pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/RESOLUTION%20MEPC.196(62).pdf).
6. Resolution MEPC.210(63)-2012. Guidelines for Safe and Environmentally Sound Ship Recycling. — Режим доступа: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/210\(63\).pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/210(63).pdf).
7. Resolution MEPC.211(63)-2012. Guidelines for the Authorization of Ship Recycling Facilities. — Режим доступа: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/211\(63\).pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/211(63).pdf).
8. Гредасова И. Б. Разработка учетной записи опасных материалов на борту судна в соответствии с Гонконгской международной конвенцией о безопасной и экологически рациональной утилизацией судов / И. Б. Гредасова // Актуальные проблемы защиты окружающей среды в химической промышленности и смежных областях: сб. тр. регион. науч.-практ. конф. — Чебоксары: Изд-во «Порядок», 2011. — С. 78–80.
9. Гредасова И. Б. Разработка Плана утилизации судна / И. Б. Гредасова // 15-й Международный науч.-промышленный форум «Великие реки 2012»: тр. конгресса. — Т. 1. — Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ». — 2012. — С. 256–258.
10. Руководство ИМО по разделке судов; резолюция A.962(23) ИМО. — СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2004. — 136 с.
11. Resolution MEPC.197(62)-2011. Guidelines for the Development of the Inventory of Hazardous Materials. — Режим доступа: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/Resolution%20MEPC.197\(62\).pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/Resolution%20MEPC.197(62).pdf).
12. ОСТ 5Р.0206-2002. Нагрузка масс гражданских судов. Классификация элементов нагрузки. — Режим доступа: http://lab-sapr.ru/ost/5r_0206-2002.pdf.
13. Р.029-2010. Требования к судам повышенной экологической безопасности. — Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=EXP&n=562301&req=doc>.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «СУДНО – ВАЕР – ТРАЛ» В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ

FORMALIZATION OF DYNAMICS MECHANICAL SYSTEM A «SHIP-DRAGROPE-TRAWL» IN TRANSIENT CONDITIONR

В статье рассмотрена проблема формализации динамики нестационарной механической системы с одной степенью свободы «судно – ваер – трал» в переходном режиме. Для математического моделирования исследуемой системы принято допущение, что гибкий ваер может быть заменен в виде ваера-стержня. Рассмотрены различные случаи внешнего воздействия, проиллюстрирован характер его влияния на поведение рассматриваемой механической системы. В процессе интерпретации полученных моделей использована разработанная методика решения отдельного класса линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. В результате найдены аналитические зависимости, описывающие динамику нестационарных процессов механической системы с одной степенью свободы «судно – ваер – трал». Полученные расчетные зависимости можно использовать при проектировании конкретного технологического оборудования, а также в процессе его эксплуатации.

In the article presented the problem of formalization dynamics of the non-stationary mechanical system is considered with one degree freedom «ship-dragrope-trawl» in transient behavior. For the mathematical design of the prospected system assumption is accepted, that a flexible dragrope can be transferable as a dragrope-bar. The different cases of external influence are in-process considered, character of his influence is illustrated on behavior of the examined mechanical system.

In the process of interpreting the models developed by the author used technique for solving a particular class of linear differential equations with variable coefficients. As a result, found analytical dependences describing the dynamics of transient processes of a mechanical system with one degree of freedom «ship-trawl warp». The calculated can be used depending on the design of the particular process equipment, as well as during its use.

Ключевые слова: математическая модель, переходный режим, внешнее воздействие на систему, система «судно – ваер – трал», аналитическое решение, механические колебания.

Keywords: mathematical model, transient behavior, external affecting system, the system is a «ship-dragrope-trawl», analytical decision, mechanical vibrations.

Введение

Проблема расчета параметров движения механической системы с переменным инерционным коэффициентом возникает при решении ряда прикладных задач. Одной из таких систем является механическая система «судно – ваер – трал».

Трал является наиболее популярным орудием лова (рис. 1). На его долю выпадает около 70 %

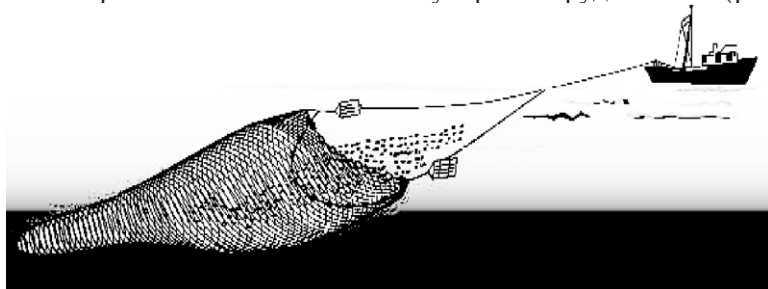


Рис. 1. Система «судно – ваер – трал»

добытой рыбы. В процессе движения система «судно – ваер – трал» испытывает значительные динамические нагрузки. Трал связан с судном с помощью ваеров (стальных тросов). Нередко наблюдаются случаи потери целостности ваеров (их разрыв). Поэтому задача формализации динамики движения ваера весьма актуальна [1], [2].

Основная часть

При решении задачи прицельного лова глубиной хода трала управляют с помощью скорости судна и длины ваера [2], [3], длину которого регулируют с помощью траловой лебедки. Движение ваера следует рассматривать в общем случае как нестационарное. Для этой цели при его формализации используют так называемую *стержневую модель* (рис. 2). Для построения такой модели заменяют гибкую нить стержнем AD_1 , оставив без изменения все остальные элементы.

Пусть в стационарном потоке жидкости находится идеально гибкий ваер AD , длина которого l , а сопротивление характеризуется параметром k_B . К концу D ваера приложена заданная сила $\bar{R}$. Пусть в том же потоке находится такого же веса стержень AD_1 , который также начинается в точке A , и к его концу D_1 приложена такая же сила. Легко показать, что можно так подобрать длину стержня и параметр k_C , характеризующий его сопротивление, что точка D_1 совместится с точкой D . Действительно, рассматривая полярные координаты точки D_1 (полюс в точке A , полярная ось параллельна скорости набегающего потока), видно, что замена параметра k_C будет менять полярный угол φ_1 , а изменение s_1 — радиус-вектор точки D_1 . Так что, изменяя обе величины, т. е. k_C и s_1 , можно задать точке D_1 любое заранее известное положение, в частности, соединить ее с точкой D . Таким образом, реальный ваер можно всегда заменить гипотетическим стержнем, не меняя при этом глубины хода распорной доски и трала. Некоторая замена характеристик собственного сопротивления ваера оказывает незначительное влияние на глубину хода трала. Поэтому далее будем считать диаметр ваера-стержня и его коэффициент сопротивления такими же, как у реального ваера-трала [1], [3].

Математическая модель ваера в общем виде может быть представлена следующим уравнением:

$$m(t) \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu(t) \frac{dx}{dt} + c(t)x = F(t). \quad (1)$$

Как было отмечено ранее, существуют моменты времени, когда длина ваера непостоянна — он вытравляется или выбирается, в общем случае, по линейному закону. Следует отметить, что сила сопротивления и вес также являются переменными величинами. На динамику движения ваера оказывает влияние качка судна, а в момент зацепа трала к ваеру может быть приложен импульс силы.

Рассмотрим переходный процесс, когда длина ваера увеличивается, т. е. увеличиваем глубину хода трала. При этом принимаем, что масса модели также увеличивается. Наиболее естественно принять, что она изменяется по линейному закону

$$m(t) = m_0(1 + kt), \quad (2)$$

где коэффициент k — интенсивность роста массы системы; m_0 — ее начальная масса.

В этом случае уравнение движения имеет вид

$$m(t) \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} + cx = F(t), \quad (3)$$

где $\mu = \frac{m_0 k}{2}$ — коэффициент, характеризующий сопротивление среды; c — коэффициент жесткости.

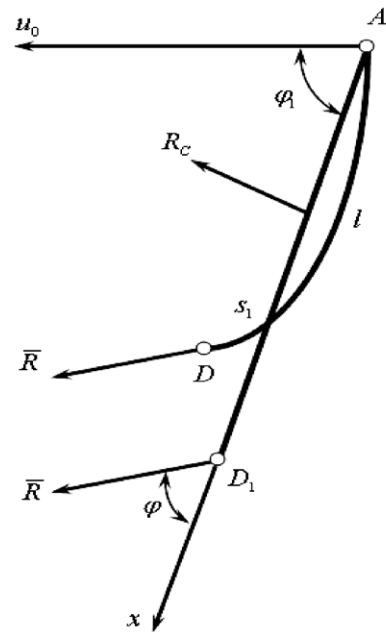


Рис. 2. Стержневая модель ваера

Тогда заданная механическая система описывается дифференциальным уравнением

$$m_0(1+kt)\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{m_0k}{2}\frac{dx}{dt} + cx = F(t). \quad (4)$$

Для нахождения закона движения выходной модели и, как следствие, определения основных характеристик необходимо найти общее решение дифференциального уравнения (4). Данное общее решение равно сумме некоторого частного решения $x_r(t)$ и общего решения $x_0(t)$ соответствующего однородного уравнения

$$x(t) = x_0(t) + x_r(t). \quad (5)$$

Как видно, полученная математическая модель системы «судно – ваер – трал» представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами. Для количественной оценки динамики движения исследуемой системы достаточно воспользоваться численными методами. Однако на стадии проектирования технологического оборудования, а также при его эксплуатации важно иметь расчетные зависимости, позволяющие аналитически определять основные характеристики и параметры механической системы. Таким образом, целью работы является поиск аналитических зависимостей, описывающих динамику нестационарных процессов механической системы с одной степенью свободы «судно – ваер – трал».

В процессе решения поставленной цели была использована разработанная методика решения отдельного класса линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами [3], [5]. Суть ее заключается в использовании замены переменной $z = f(t)$, которая позволяет в исходном уравнении (3) перейти к уравнению с постоянными коэффициентами.

Дифференциальное уравнение свободных колебаний исходной механической системы можно записать в виде

$$m_0(1+kt)\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{m_0k}{2}\frac{dx}{dt} + cx = 0. \quad (6)$$

Данное дифференциальное уравнение является линейным, один из коэффициентов которого — переменный. Для нахождения аналитического решения такого вида уравнений предложен метод постоянных коэффициентов при производных по новой переменной [3] – [7], в соответствии с которым следует ввести новую переменную $z = f(t)$, условно названную *определяющей функцией*. Тогда возможен переход к дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами и производными по новой переменной. Для перехода к дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами и производными по новой переменной введем новую переменную $z = \sqrt{1+kt}$. Пусть коэффициенты C_0 , C_1 и C_2 будут иметь вид $C_0 = \frac{m_0k^2}{4}$, $C_1 = 0$ и $C_2 = c$. С учетом этого уравнение (6) перепишем в виде

$$\frac{m_0k^2}{4}\frac{d^2x}{dz^2} + cx = 0$$

или

$$\frac{d^2x}{dz^2} + \frac{4}{k^2}\omega_0^2x = 0, \quad (7)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m_0}}$ — начальная частота свободных колебаний.

Решив полученное уравнение методом неопределенных коэффициентов и перейдя к исходной переменной t , получим общее решение $x_0(t)$ соответствующего однородного уравнения, которое описывает динамику свободного движения системы:

$$x_0(t) = a \sin\left(\frac{2}{k}\omega_0\sqrt{1+kt} + \gamma\right). \quad (8)$$

Определим постоянные величины α и γ , исходя из начальных условий, что при $t = 0$ $x = x_0$ и $\dot{x} = \dot{x}_0$:

$$a = \sqrt{x_0^2 + \frac{\dot{x}_0^2}{\omega_0^2}} \quad \text{и} \quad \gamma = \arctg \frac{x_0 \omega_0}{\dot{x}_0} - \frac{2}{k} \omega_0. \quad (9)$$

Как видно, данное уравнение описывает незатухающие колебания. Так как при достижении своего максимального значения скорость тела равна нулю, можно показать, что полупериоды движения увеличиваются согласно зависимости

$$\tau_n^0 = \frac{k\pi}{2\omega_0^2} (n\pi - \gamma).$$

Амплитуда движения при этом постоянна и равна a .

Внешняя сила осуществляет положительную работу, обеспечивая прилив энергии к механической системе. Характер движения при этом может значительно отличаться. Приложенная нагрузка может изменяться со временем по различным законам [5], [8].

Допустим, что в начальный момент времени к исследуемой механической системе «судно – ваер – трал» приложена сила F_0 , мгновенно возрастающая и сохраняющая затем постоянное значение. Тогда дифференциальное уравнение такого движения имеет вид

$$m_0(1+kt) \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{m_0k}{2} \frac{dx}{dt} + cx = F_0. \quad (10)$$

Учитывая новую переменную и полученные значения постоянных коэффициентов, в соответствии к предложенной нами методике, перейдем к дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^2x}{dz^2} + \frac{4}{k^2} \omega_0^2 x = \frac{4F_0}{m_0k^2}. \quad (11)$$

Частное решение данного уравнения найдем в виде $x_r(t) = \frac{F_0}{c}$. Отсюда перемещение заданной системы под действием внезапно приложенной нагрузки описывается уравнением

$$x(t) = a \sin\left(\frac{2}{k} \omega_0 \sqrt{1+kt} + \gamma\right) + \frac{F_0}{c}. \quad (12)$$

Анализ полученной зависимости показывает, что такие колебания также незатухающие, полупериод, как и в случае свободных колебаний, увеличивается по закону $\tau_n^0 = \frac{k\pi}{2\omega_0^2} (n\pi - \gamma)$. Внезапно приложенная нагрузка влияет только на положение равновесия, изменяя его на величину $\frac{F_0}{c}$, амплитуда движения при этом относительно нового центра постоянна и также равна a .

Пусть приложенная к системе нагрузка изменяется по закону $F(t) = k_0 t$, где k_0 — постоянный коэффициент, характеризующий темп роста силы. В этом случае движение системы описывается уравнением

$$m_0(1+kt) \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{m_0k}{2} \frac{dx}{dt} + cx = k_0 t. \quad (13)$$

Исходя из выражения, определяющего новую переменную $z = \sqrt{1+kt}$, получим

$$t = \frac{1}{k} (z^2 - 1). \quad (14)$$

Отсюда соответствующее уравнение с постоянными коэффициентами и производными по переменной z будет иметь вид

$$\frac{d^2x}{dz^2} + \frac{4}{k^2} \omega_0^2 x = \frac{4k_0}{m_0k^2} \frac{1}{k} (z^2 - 1). \quad (15)$$

В этом случае уравнение колебательного движения системы может быть представлено в форме

$$x(t) = a \sin \left(\frac{2}{k} \omega_0 \sqrt{1+kt} + \gamma \right) + \frac{k_0}{c} \left(t - \frac{m_0 k}{2} \right). \quad (16)$$

Данное уравнение описывает движение механической системы относительно прямой $\frac{k_0}{c} \left(t - \frac{m_0 k}{2} \right)$.

Допустим, что в момент зацепа троса к ваеру [3], [9] может быть приложен импульс силы F в течение бесконечно малого времени $\theta < t < 0$:

$$J = \lim_{\theta \rightarrow 0} \int_{-\theta}^0 F dt, \quad (17)$$

который имеет конечное значение. В соответствии с теоремой импульсов тело получает в течение времени действия импульса скорость $\dot{x}_0 = \frac{J}{m_0}$. Сдвиг тела в течение этого времени при $\theta \rightarrow 0$ стремится к нулю [3], [5], [10], [11]. При этом закон движения системы под действием импульсивной нагрузки запишем в виде

$$x(t) = a_1 \sin \left(\frac{2}{k} \omega_0 \sqrt{1+kt} + \gamma_1 \right), \quad (18)$$

где a_1 и γ_1 — постоянные величины, определяемые из начальных условий при $t = 0$ $x_0 = 0$ и $\dot{x}_0 = \frac{J}{m_0}$:

$$a_1 = \frac{J}{\sqrt{m_0 c}} \quad \text{и} \quad \gamma = -\frac{2}{k} \omega_0. \quad (19)$$

Особый интерес представляет случай колебательного движения под действием гармонической силы. Пусть она изменяется по закону $F_0 \sin pt$, где p — частота ее колебаний.

Поведение искомой механической системы под действием гармонической силы описывается дифференциальным уравнением

$$m_0 (1+kt) \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{m_0 k}{2} \frac{dx}{dt} + cx = F_0 \sin pt. \quad (20)$$

С учетом уравнения (10) получим дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами, интегрируемое в квадратурах:

$$\frac{d^2 x}{dz^2} + \frac{4}{k^2} \omega_0^2 x = \frac{4F_0}{m_0 k^2} \sin \left[\frac{p}{k} (z^2 - 1) \right]. \quad (21)$$

Частное решение уравнения (2.56) найдем в виде

$$x_r(t) = \frac{F_0}{c \sqrt{A^2 + B^2}} \sin \left(pt + \operatorname{arctg} \frac{B}{A} \right), \quad (22)$$

где
$$A = 1 - \frac{p^2}{\omega_0^2} (1+kt) \quad \text{и} \quad B = \frac{kp}{2\omega_0^2}. \quad (23)$$

Исследование движения механической системы под действием гармонической силы имеет важное значение. Как известно, при равенстве собственной частоты системы и частоты возмущающей силы возникает явление резонанса, которое влечет за собой нестабильность работы данного механизма. В рассматриваемой модели (4) приняли, что инерционный коэффициент является функцией от времени $m(t) = m_0 (1+kt)$. Отсюда следует, что и собственная частота будет переменной. При этом можно показать, что в данном случае закон ее изменения имеет вид

$$\omega_0(t) = \sqrt{\frac{c}{m_0 (1+kt)}}.$$

Учитывая, что резонанс возникает при $\omega_0 = p$, определим время прохождения исследуемой модели через зону резонанса:

$$t_p = \frac{1}{k} \left(\frac{c}{m_0 p^2} - 1 \right).$$

Допустим, что на механическую систему действует периодическая произвольная сила $F(t)$. В качестве примера возьмем силу, изменяющуюся по закону

$$F(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < l \\ F_0, & l \leq t < 2l \end{cases} \quad (24)$$

с периодом $2l$.

Представим данную нагрузку в виде ряда Фурье:

$$F(t) = \frac{F_0}{2} - \frac{2F_0}{\pi} \sin pt - \frac{2F_0}{3\pi} \sin 3pt - \frac{2F_0}{5\pi} \sin 5pt - \dots \quad (25)$$

Согласно принципу независимости действия сил, смещение тела, которое вызвано действием силы, разложенной в ряд, равно сумме смещение, вызванных каждым из членов ряда, т. е.

$$x_r(t) = \frac{2F_0}{m_0 c k^2} + \frac{2F_0}{m_0 c \pi k^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n - 1}{n \sqrt{A_n^2 + B_n^2}} \sin \left(npt + \arctg \frac{B_n}{A_n} \right), \quad (26)$$

$$\text{где} \quad A_n = 1 - \frac{(np)^2}{\omega_0^2} (1 + kt) \quad \text{и} \quad B_n = \frac{knp}{2\omega_0^2}. \quad (27)$$

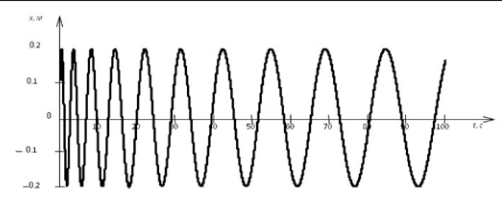
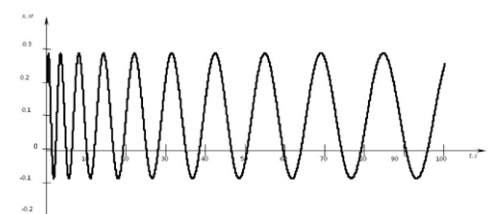
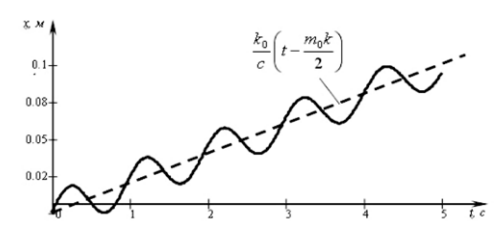
Явление резонанса при негармоническом возмущении возникает при совпадении частоты n -й гармоники с собственной частотой колебаний системы.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

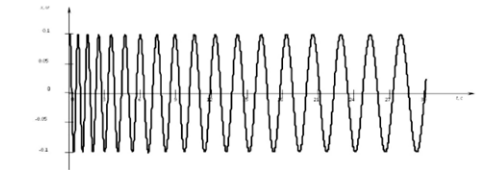
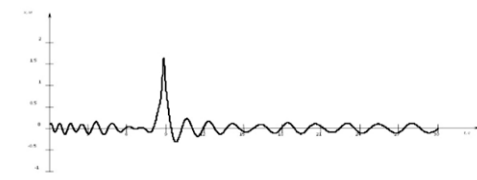
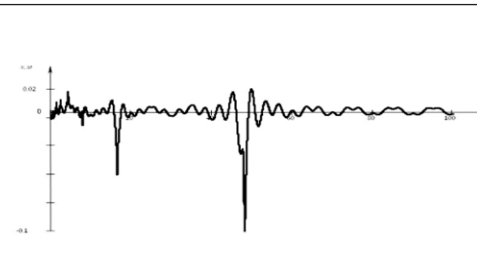
– найдены аналитические зависимости, описывающие динамику нестационарных процессов механической системы с одной степенью свободы «судно – ваер – трал», результаты которых сведены в таблицу;

– выполнено имитационное моделирование, наглядно иллюстрирующее характер динамики переходного процесса в случаях различного внешнего воздействия на исследуемую систему

Обобщенные результаты аналитического исследования системы «судно-ваер-трал»

Свободные колебания $F(t) \equiv 0$	$x_0(t) = a \sin \left(\frac{2}{k} \omega_0 \sqrt{1 + kt} + \gamma \right)$	
Внезапная нагрузка $F(t) = F_0$	$x(t) = a \sin \left(\frac{2}{k} \omega_0 \sqrt{1 + kt} + \gamma \right) + \frac{F_0}{c}$	
Линейно возрастающая нагрузка $F(t) = k_0 t$	$x(t) = a \sin \left(\frac{2}{k} \omega_0 \sqrt{1 + kt} + \gamma \right) + \frac{k_0}{c} \left(t - \frac{m_0 k}{2} \right)$	

(Окончание)

Импульсная нагрузка $J = \lim_{\theta \rightarrow 0} \int_{-\theta}^0 F dt$	$x(t) = a_1 \sin\left(\frac{2}{k} \omega_0 \sqrt{1+kt} + \gamma_1\right)$	
Периодическая гармоническая нагрузка $F(t) = F_0 \sin pt$	$x(t) = a \sin\left(\frac{2}{k} \omega_0 \sqrt{1+kt} + \gamma_1\right) + \frac{F_0}{c\sqrt{A^2+B^2}} \sin\left(pt + \arctg \frac{B}{A}\right)$	
Периодическая негармоническая нагрузка $F(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < l \\ F_0, & l \leq t < 2l \end{cases}$	$x(t) = a \sin\left(\frac{2}{k} \omega_0 \sqrt{1+kt} + \gamma_1\right) + \frac{2F_0}{m_0 c k^2} + \frac{2F_0}{m_0 c \pi k^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n - 1}{n\sqrt{A_n^2+B_n^2}} \sin\left(npt + \arctg \frac{B_n}{A_n}\right)$	

Список литературы

1. Фридман А. Л. Сборник задач и упражнений по теории и проектированию орудий промышленного рыболовства / А. Л. Фридман, М. М. Розенштейн. — М.: Агропромиздат, 1987. — 256 с.
2. Фридман А. Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства / А. Л. Фридман. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. — 328 с.
3. Ивановская А. В. Построение математической модели неводоуловочного комплекса на этапе кошелькования невода / А. В. Ивановская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — Т. 6. — № 7 (60). — С. 62–66.
4. Кислый А. А. Интегрирование линейных дифференциальных уравнений третьего порядка с переменными коэффициентами / А. А. Кислый, Н. В. Ивановский, А. В. Ивановская // Сб. науч. тр. Керченского государственного морского технологического университета. — 2008. — № 9. — С. 38–41.
5. Ivanovskaya A. The research of the dynamic of the mechanical system with variable parameters. Journal of Vibroengineering. ISSN 1392-8716. Kaunas, Lithuania. — December, 2010. — volume 12, issue 4. — P. 494–499.
6. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. — М.: Высш. шк., 1980. — 408 с.
7. Соколов С. С. Построение информационного обеспечения безопасной эксплуатации судна при помощи автоматизации управления размещением груза и реагирования на внештатные ситуации / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 184–190.
8. Черный С. Г. Интеллектуальная поддержка принятия решений при оптимальном управлении для судовых электроэнергетических систем / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 68–75.
9. Голиков С. П. Математическое моделирование элементов тралового комплекса / С. П. Голиков, Н. В. Ивановский, С. Г. Черный, Н. П. Сметюх, О. С. Скидан // Водный транспорт. — К.: КДАВТ, 2013. — № 2 (17). — С. 181–190.
10. Ивановский Н. В. Элементы математического моделирования для процессов судовождения / Н. В. Ивановский, С. П. Голиков, С. Г. Черный, А. С. Кузьменко, Д. Г. Куценко // Проблеми інформаційних технологій. — 2013. — № 1 (13). — С. 128–131.
11. Черный С. Г. Системный анализ процессов синергетики для судоходной отрасли / С. Г. Черный // Транспорт: наука, техника, управление. — 2014. — № 8. — С. 12–15.

УДК 629.5

М. С. Горохов,
асп.;

Е. П. Роннов,
д-р техн. наук, проф.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ КОРПУСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО СТОЕЧНОГО СУДНА НА СТАДИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

DEFINITION OF THE MASS OF REINFORCED CONCRETE STATIONARY VESSEL HULL AT THE STAGE OF RESEARCH DESIGNING

В статье приведены результаты статистического исследования главных размерений и основных характеристик судов стоечного типа с корпусом из железобетона. Показан характер зависимости значений измерителя массы железобетонного корпуса рейдовых причалов и дебаркадеров от его кубического модуля. Предложены формулы для расчета измерителя массы железобетонного корпуса рейдовых причалов и дебаркадеров, которые могут быть использованы на стадии исследовательского проектирования. Выполнен анализ точности расчета массы железобетонного корпуса с использованием полученных формул, показавший приемлемую для исследовательской стадии проектирования точность. Предложена методика для более точного определения массы корпуса железобетонного стоечного судна с учетом его проектных и конструктивно-технологических особенностей. Полученные в ходе исследования результаты предлагается использовать при исследовательском проектировании судна стоечного типа с различными вариантами конструкции корпуса.

The article shows the results of static investigation of main dimensions and main parameters of stationary vessels with reinforced concrete hulls. The author shows the relation between the meanings of the mass indicator of wharves and concrete vessels and their cubic modulus. Suggested are the formulae for calculation of the mass indicator of wharves and concrete vessels at the stage of their research designing. Provided in the article is the analysis of exactness of mass calculation of reinforced concrete hull with application of the formulae, having shown the needed accuracy at the stage of the research designing. The author suggests the methodology for more exact definition of the mass of a reinforced concrete stationary vessel hull, taking into consideration its design and technical parameters. The obtained results of the investigation can be used at the research designing of a stationary vessel with different variants of hull structure.

Ключевые слова: стоечное судно, исследовательское проектирование, железобетон, корпус, кубический модуль, измеритель массы, прототип, конструктивный элемент, главные размерения.

Key words: a stationary vessel, research designing, reinforced concrete, hull, cubic modulus, mass indicator, prototype, structure element, main dimensions.



АК известно [1], [2], железобетон имеет ряд серьезных преимуществ в качестве материала корпуса стоечных судов, к которым относятся, прежде всего, различного типа дебаркадеры и рейдовые причалы [3]. Уже на начальной стадии проектирования железобетонного судна стоечного типа одним из наиболее важных показателей, влияющих на его будущие технико-экономические показатели, является масса его железобетонного корпуса. От того, насколько точно будет определена масса корпуса, зависят эксплуатационно-технические качества судна [4], трудоемкость и стоимость его постройки.

Определение массы корпуса на начальной стадии проектирования можно выполнить двумя различными способами: используя либо показатели наиболее близкого судна-прототипа, либо зависимости, полученные в результате обработки статистических данных существующих проектов судов. Использование данных близкого прототипа [5] практически невозможно при исследовательском проектировании судна, когда анализируются зависимости характеристик судна от его элементов. В этом случае наиболее точные значения массы корпуса можно получить на основе статистических данных.

Целью данной работы является получение статистических зависимостей, позволяющих найти массу железобетонного корпуса стоечного судна с учетом его архитектурно-конструктивных особенностей. Для этого были проанализированы главные размерения и основные характеристики проектов рейдовых причальных понтонов и дебаркадеров с корпусом из железобетона.

Дебаркадеры и рейдовые причальные понтоны с корпусом из железобетона предназначены для швартовки различных типов судов, посадки и высадки пассажиров, производства грузовых операций пассажирского и грузопассажирского флота. Все рассмотренные проекты причальных понтонов и дебаркадеров, спроектированные по Правилам речного регистра РСФСР, предназначены для эксплуатации на внутренних водных путях. Суда являются стоечными, а их корпус изготовлен из тяжелого судостроительного бетона с крупным наполнителем в виде щебня или гравия, армированного горячекатаной стержневой арматурой различных классов прочности. Прямоугольный в плане, с транцевым носом и кормой, наклонными подрезами или без подрезов в оконечностях геометрически корпус имеет форму параллелепипеда. Внутреннее пространство корпуса разделено на отсеки продольными или поперечными проницаемыми или непроницаемыми переборками. Система набора корпуса — поперечная, смешанная либо безнаборная. Наружная обшивка представляет собой плоские железобетонные плиты [6]. Набор корпуса состоит из железобетонных балок прямоугольного сечения.

Архитектурно-конструктивный тип рейдовых причальных понтонов характеризуется отсутствием развитой надстройки. Грузовые лабазы размещаются в корпусе, а для пассажиров на палубе устроены открытые площадки, снабженные легкими тентами. Архитектурно-конструктивный тип дебаркадеров характеризуется развитой двух- или трехъярусной надстройкой, размещение груза предусматривалось во внутренних отсеках корпуса либо в надстройке на главной палубе [7].

Статистическое исследование, проведенное в рамках данной статьи, охватывает суда длиной от 20 до 85 м. Соотношение главных размерений у рассматриваемых судов является традиционным для дебаркадеров и причальных понтонов и отвечает предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям. Учитывая рассмотренные архитектурно-конструктивные особенности, было принято решение выполнять определение массы железобетонного корпуса с использованием формулы первой группы [8], основанное на предположении о том, что масса корпуса прямо пропорциональна кубическому модулю LBH :

$$P_k = \psi_k LBH, \quad (1)$$

где ψ_k — масса 1 м³ параллелепипеда со сторонами $L \times B \times H$ (измеритель массы корпуса).

Элементы и характеристики рассматриваемых судов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Главные размерения и характеристики рейдовых причальных понтонов и дебаркадеров

Проект	Класс PPP	Система набора	L , м	B , м	H , м	LBH , м ³	Ψ_k , т/м ³
Рейдовые причальные понтоны							
154	Р	Поперечная	65	14	3,2	2912	0,197
146(1)	Р	Безнаборная	20	8	2	320	0,258
146(2)	Р	Безнаборная	20	8	2	320	0,262
P24(1)	О	Поперечная	42	15	2,8	1764	0,207
P24(2)	О	Поперечная	42	8	2,8	940,8	0,256
P66	Р	Безнаборная	30	10	2,2	660	0,248
123A	Р	Поперечная	65	14	3,2	2912	0,197
157(1)	Р	Поперечная	45	12	2,8	1512	0,241
157(2)	Р	Поперечная	42	12	2,8	1411,2	0,267
157(3)	Р	Поперечная	45	12	2,8	1512	0,212

Таблица 1
(Окончание)

133Б	Р	Поперечная	45	12	2,8	1512	0,209
61	р	Безнаборная	20	7	2	280	0,273
133(1)	Р	Поперечная	45	12	2,8	1512	0,209
133В	Р	Поперечная	45	12	2,8	1512	0,209
Дебаркадеры							
123/823	Р	Поперечная	64,4	14	3,2	2885,12	0,200
833	Р	Поперечная	35	10	2,8	980	0,221
47	Р	Безнаборная	35	9,6	2,8	940,8	0,246
47Б	Р	Безнаборная	35	9,6	2,8	940,8	0,224
61А(1)	Р	Безнаборная	20	7	2	280	0,285
61А(2)	Р	Безнаборная	20	7	2	280	0,261
61А(3)	Р	Безнаборная	20	7	2	280	0,273
61Б	Р	Безнаборная	20	7	2	280	0,272
39	О	Безнаборная	20	7	2	280	0,283
48	Р	Смешанная	85	20	3,7	6290	0,191
33	Р	Смешанная	65	14	3,6	3276	0,188
123	Р	Поперечная	65	14	3,2	2912	0,188
137(1)	Р	Смешанная	65	14	3,2	2912	0,187
137(2)	Р	Поперечная	65	14	3,2	2912	0,196
133-02(2)	Р	Поперечная	45	12	2,8	1512	0,215
10130	Р	Поперечная	45	12	3,2	1728	0,198
133А	Р	Поперечная	45	12	2,8	1512	0,209
133-02(1)	Р	Безнаборная	45	12	2,8	1512	0,225
14	Р	Смешанная	42	12	3	1512	0,212
20	Р	Смешанная	45	12	3	1620	0,205
55	Р	Смешанная	45	12	3	1620	0,207
62(1)	Р	Смешанная	45	12	3	1620	0,204

Примечание. L , B , H — соответственно расчетная длина, ширина и высота корпуса.

Для нахождения зависимости измерителя массы корпуса Ψ_k от элементов судна отдельно для причальных понтонов и дебаркадеров были построены кривые $\Psi_k = f(LBN)$ — рис. 1 и 2, затем с использованием метода наименьших квадратов найдены их аппроксимационные уравнения.

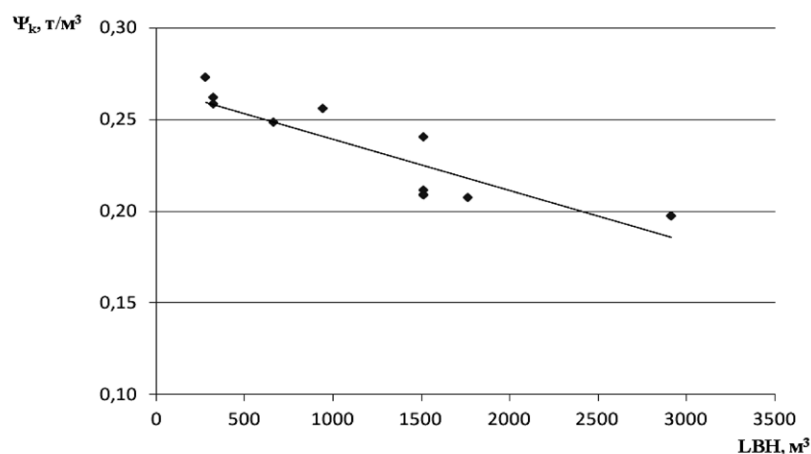


Рис. 1. Измеритель массы корпуса Ψ_k причальных понтонов

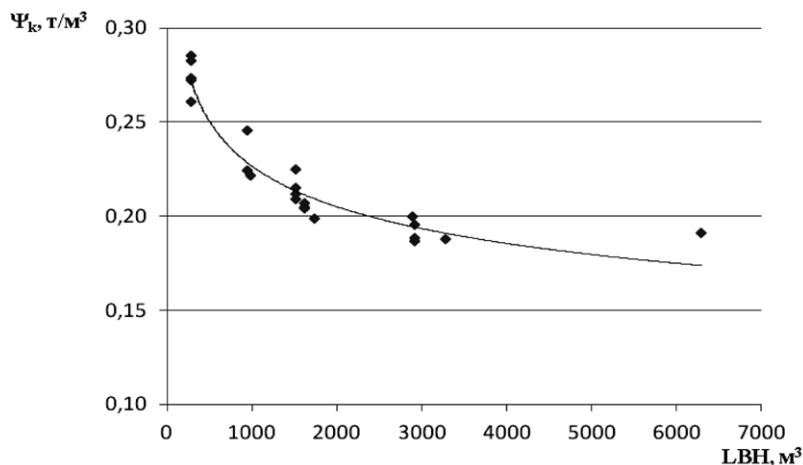


Рис. 2. Измеритель массы корпуса Ψ_k дебаркадеров

Как видно из приведенных графиков, для железобетонных судов подтверждается известная зависимость уменьшения измерителя массы корпуса с увеличением размеров судна. Для причальных понтонов зависимость измерителя массы корпуса Ψ_k от кубического модуля линейная. Для дебаркадеров же эта зависимость имеет характер степенной функции. Таким образом, измеритель массы корпуса Ψ_k предлагается определять по следующим формулам:

– для рейдовых причальных понтонов

$$\psi_k = -0,3 \cdot 10^{-4} LBH + 0,27; \quad (3)$$

– для дебаркадеров

$$\psi_k = 0,6 LBH^{-0,14}. \quad (4)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета массы корпуса по полученным формулам. В случае, если палуба судна рассчитана на восприятие значительных местных нагрузок, таких как нагрузка от колес транспортных средств, задействованных в обслуживании судов (например, суда пр. 157(2)), значения Ψ_k , рассчитанные по формулам (3) и (4), следует увеличить на 15 % [9].

Таблица 2

**Анализ точности расчета массы корпуса плавучих причалов
и дебаркадеров по полученным формулам**

Проект	Масса корпуса P_k , т		Погрешность, %
	фактическая	расчетная	
Плавучие причалы			
154	575	531,3	7,60
146(1)	82,7	83,3	0,69
146(2)	83,9	83,3	0,75
P24(1)	366	382,6	4,54
P24(2)	241	227,3	5,69
P66	164	165,0	0,62
123A	575	531,3	7,60
157(1)	364	339,4	6,76
157(3)	320	339,4	6,06
133Б	316	339,4	7,40
61	76,5	73,2	4,32
133(1)	316	339,4	7,40
133B	316	339,4	7,40

Таблица 2
(Окончание)

Дебаркадеры			
123/823	576	568,9	1,23
833	217	224,7	3,54
47	231	216,9	6,09
47Б	211	216,9	2,81
61А(1)	79,9	76,5	4,30
61А(2)	73	76,5	4,74
61А(3)	76,5	76,5	0,05
61Б	76,2	76,5	0,34
39	79,1	76,5	3,34
48	1202	1112,4	7,45
33	616	634,6	3,02
123	548	573,4	4,64
137(1)	544	573,4	5,41
137(2)	570	573,4	0,61
133-02(2)	325	326,3	0,39
10130	343	366,0	6,71
133А	316	326,3	3,25
133-02(1)	340	326,3	4,04
14	320	326,3	1,96
20	332	346,2	4,29
55	335	346,2	3,35
62(1)	331	346,2	4,60

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что средняя погрешность при определении массы корпуса причалов по полученным формулам не превышает 5 %, для дебаркадеров — 4 %. Данные значения погрешности являются приемлемыми при исследовательском проектировании железобетонного корпуса стоечного судна.

Обобщенная оценка точности выполненной аппроксимации производилась с использованием статистического критерия Фишера [10]. Для причальных понтонов значение F -критерия составляет 1,28, что меньше табличного значения — 2,58. Для дебаркадеров F -критерий составил 1,42 при табличном значении 1,98. На основании полученных значений можно сделать вывод о том, что по полученным формулам масса железобетонного корпуса определяется с достаточной для исследовательской стадии проектирования точностью. Однако более точно массу корпуса железобетонного судна, учитывая его проектные особенности, можно рассчитать как сумму масс его основных конструктивных элементов, каждый из которых рассчитывается с использованием соответствующих модулей:

$$P_k = \sum_{i=1}^n \psi_{ik} M_{ik}, \quad (5)$$

где ψ_{ik} , M_{ik} — измеритель массы и модуль пересчета i -го конструктивного элемента корпуса.

В этом случае, учитывая упрощенную форму обводов, близкую к прямоугольному параллелепипеду, массу корпуса можно представить в следующем виде:

$$P_k = (\psi_{1k} + \psi_{3k})LB + (2\psi_{2k} + \psi_{6k} \cdot n_{пл})LH + (\psi_{4k} + \psi_{5k} \cdot n_{пн})BH + 2\psi_{7k}(L + H) \cdot m_{пл} + 2\psi_{8k}(B + H) \cdot m_{пн} + (\psi_{9k} + \psi_{10k})LBH. \quad (6)$$

где ψ_{1k} — измеритель массы плиты днища; ψ_{2k} — измеритель массы плиты борта; ψ_{3k} — измеритель массы плиты палубы; ψ_{4k} — измеритель массы плиты транцев; ψ_{5k} — измеритель массы поперечных переборок; ψ_{6k} — измеритель массы продольных переборок; ψ_{7k} — измеритель массы продольных ребер; ψ_{8k} — измеритель массы поперечных ребер; ψ_{9k} — измеритель массы местных усилений и фундаментов; ψ_{10k} — измеритель массы закладных деталей; $n_{пп}$ — количество поперечных переборок; $n_{пд}$ — количество продольных переборок; $m_{пп}$ — количество поперечных балок набора; $m_{пд}$ — количество продольных балок набора;

При отсутствии близкого прототипа и учитывая минимально необходимую толщину плит, значения данных измерителей масс могут быть приняты в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Значения измерителей масс

Измеритель	ψ_{1k}, ψ_{2k}	ψ_{3k}	ψ_{4k}	ψ_{5k}, ψ_{6k}	ψ_{7k}	ψ_{8k}	ψ_{9k}	ψ_{10k}
Значение	0,16	0,13	0,18	0,11	0,06	0,04	0,005	0,001

Приведенные значения измерителей масс различных конструктивных элементов железобетонного корпуса являются ориентировочными. Для более точного расчета массы их необходимо корректировать, учитывая конструктивные особенности проектируемого стоечного судна и характеристики, предъявляемые к его элементам. Для конструктивных элементов в виде плит измерители $\psi_{1k} - \psi_{4k}$ могут быть рассчитаны следующим образом [11]:

$$\psi_{ik} = \delta_{ik} \cdot (\rho_6 + k_{арм} \cdot \rho_{арм}), \quad (7)$$

где δ_{ik} — толщина плиты i -го конструктивного элемента, м;

ρ_6 — плотность судостроительного бетона, т/м³;

$\rho_{арм}$ — плотность арматурной стали, т/м³;

$k_{арм}$ — коэффициент армирования сечения железобетонного элемента.

Для конструктивных элементов в виде ребер набора корпуса измерители ψ_{7k}, ψ_{8k} могут быть рассчитаны в виде

$$\psi_{ik} = h_{ip} \cdot b_{ip} \cdot (\rho_6 + k_{арм} \cdot \rho_{арм}), \quad (8)$$

где h_{ip} — высота ребра i -го конструктивного элемента, м;

b_{ip} — ширина ребра i -го конструктивного элемента, м.

Выводы

1. В результате проведенного статистического анализа главных размерений и основных характеристик рейдовых причалов и дебаркадеров получены формулы для расчета измерителя массы железобетонного корпуса, который в последующем используется для определения массы корпуса.

2. Проведенный анализ точности расчета массы железобетонного корпуса с использованием полученных формул показал приемлемую для исследовательской стадии проектирования точность.

3. Для более точного определения массы корпуса железобетонного стоечного судна предложена методика и значения измерителей масс, учитывающие его проектные и конструктивно-технологические особенности.

Список литературы

1. Бондурянский З. П. Морские железобетонные суда (проектирование корпуса) / З. П. Бондурянский, М. А. Дьячков, Э. Е. Меламед. — Л.: Судостроение, 1966. — 200 с.

2. *Горохов М. С.* Состояние и направления развития корпусных конструкций судов из железобетона / М. С. Горохов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 35. — С. 67–70.
3. Дебаркадер // Википедия. [2014 – 2014]. Дата обновления: 27.08.2014. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=65111407> (дата обращения: 27.12.2014).
4. *Анфимов В. Н.* Техничко-эксплуатационные качества судов смешанного плавания / В. Н. Анфимов. — М.: Транспорт, 1974. — 271 с.
5. *Бронников А. В.* Проектирование судов / А. В. Бронников. — Л.: Судостроение, 1991. — 320 с.
6. *Горохов М. С.* Влияние параметров дисперсного армирования на трещиностойкость судовых конструкций из фибробетона / М. С. Горохов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 68–73.
7. *Егоров Н. М.* Справочник по железобетонному судостроению (суда внутреннего плавания) / Н. М. Егоров [и др.]. — Л.: Судостроение, 1969. — 356 с.
8. *Ашик В. В.* Проектирование судов: учебник / В. В. Ашик. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1985. — 320 с.
9. *Синцов Г. М.* Конструкция и прочность железобетонных судов / Г. М. Синцов [и др.]. — Л.: Судостроение, 1969. — 384 с.
10. *Базилевский С. А.* Теория ошибок, возникающих при проектировании судов / С. А. Базилевский. — Л.: Судостроение, 1964. — 200 с.
11. *Егоров Н. М.* Проектирование элементов корпуса железобетонного судна: учеб. пособие для студентов кораблестроительного факультета / Н. М. Егоров. — Горький: ГИИВТ, 1980. — С. 85.

УДК 629.122

Е. В. Купальцева,
асп.

АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ ДЛЯ ВНУТРИГОРОДСКИХ И ПРИГОРОДНЫХ ЛИНИЙ

ANALYSIS OF THE DESIGN CHARACTERISTICS OF THE MAIN ELEMENTS OF INLAND VESSELS

Пассажирские суда, предназначенные для работы на внутригородских и пригородных линиях, по архитектурно-конструктивным признакам разделены на четыре типа. Основными признаками деления являются палубность и принцип расположения пассажирских мест. На основе статистического анализа для каждого из типов выявлено влияние пассажироемкости на величину водоизмещения и коэффициента утилизации. В функции от пассажироемкости, как наиболее важного параметра, выявлены устойчивые регрессионные зависимости для определения главных размеров судна для каждого из выделенных типов. В общем случае получены аналитические зависимости проектных характеристик в функции от водоизмещения. Для оценки мощности на стадии концептуального проектирования предлагается использовать зависимость адмиралтейского коэффициента в функции от скорости. В работе приводятся соответствующие коэффициенты для двухкомпонентной формулы и регрессионная зависимость.

Passenger vessels operating on urban and domestic routes, on architectural and design solutions are divided into four main types. Main signs the division are decked and the principle of the location of passenger seats. On the basis of statistical analysis for each of the types identified impact passenger capacity on the magnitude of the displacement and the utilization rate. As well as depending on the passenger capacity of the identified sustainable regression dependences for determination of the main dimensions of the vessel for each of the selected types. In general, the obtained analytical dependences of design characteristics in a function of displacement. To estimate the power at the stage of conceptual design is proposed to use the dependence of the Admiralty coefficient as

a function of the speed. The paper presents the corresponding coefficients for the two-component formula and regression dependence.

Ключевые слова: «малые» пассажирские суда, главные размерения, пассажировместимость, коэффициент утилизации водоизмещения, адмиралтейский коэффициент.

Key words: inland vessels, the principal dimensions, seating capacity, deadweight coefficient, Admiralty coefficient.



НАЛИЗ отечественной и зарубежной научной литературы, посвященной проектированию «малых» речных пассажирских судов, позволяет сделать вывод о недостаточном уровне разработки методики проектирования рассматриваемого типа судов и отсутствии систематизированных данных об их элементах и характеристиках. На начальном этапе проектирования, когда основной задачей является определение главных элементов судна, широкое применение имеет метод статистического анализа. Его основы отражены в трудах В. В. Ашика, В. Л. Поздюнина, Л. М. Ногида, А. В. Бронникова и др. [1] – [3]. Правильно обработанные статистические данные по уже построенным судам дают возможность для достоверного анализа характера изменения той или иной величины, ее зависимости от элементов и характеристик судна.

Целью данной работы является выявление устойчивых статистических зависимостей для определения на начальном этапе проектирования главных элементов речных пассажирских судов для местных и внутригородских линий с целью последующей их оптимизации [4]. Анализировались характеристики 27 проектов отечественных речных пассажирских судов, предназначенных для работ на внутригородских и местных линиях. Они имеют длину от 10 до 50 м, суммарную мощность силовой установки от 50 до 450 л. с., скорость хода в диапазоне от 13 до 24 км/ч, пассажировместимость от 40 до 300 чел.

При выполнении анализа необходимо учесть, что рассматриваемые типы судов имеют разнообразные архитектурно-компоновочные решения [5]. Это обусловлено, прежде всего, их различной пассажировместимостью, назначением, классом судна, протяженностью линий эксплуатации и особенностью размещения пассажиров и пассажирских помещений. Можно выделить следующие архитектурно-конструктивные типы.

Тип I представлен однопалубными судами с расположением пассажиров в трюме и в надстройке на главной палубе. Данные суда имеют большее водоизмещение и более высокий класс.

Пассажирские салоны в трюме расположены в носовой и средней частях (при размещении машинного помещения в корме), либо в носовом и кормовом отсеках (когда машинное помещение находится в средней части судна). Представителями этого типа являются суда типа «ОМ», пр. 839, пр. 81080. Места для расположения пассажиров в трюме и на главной палубе оборудуются мягкими диванами, либо жесткими скамьями (тип «ОМ»), либо четырехместными сиденьями и столом (пр. 81080). На судне предусматривается буфет, санитарный блок, а так же каюты для экипажа и другие служебные помещения.

Тип II включает группу судов, на которых пассажиры размещаются в трюме в полуутопленной надстройке, на ее крыше предусматривается пассажирская палуба, иногда снабжаемая легким тентом.

В зависимости от расположения машинного помещения, аналогично предыдущему типу, салоны находятся либо в кормовой и носовой частях трюма, либо в средней и носовой. Примером этого типа являются суда пр. Р35, Р51Э, пр. 544, пр. К-80 и др.

Тип III однопалубные суда, являющиеся подвидом II типа и отличающиеся от них только тем, что на крыше надстройки пассажирская палуба не предусматривается. Примером судов данного типа являются пр. 222, пр. Р118, пр. 23020 и др.

Тип IV беспалубные открытые суда с расположением пассажирских кресел на палубе трюма, для защиты от непогоды над ними обычно устанавливается легкий тент. Представителями данного типа можно считать пр. 2044, пр. 792, тип «Пригородный». Машинное помещение также

располагается либо в средней части, либо в корме. Ходовая рубка — в носу и средней части судна. Дальнейший анализ элементов и характеристик был проведен с учетом выделенных архитектурно-конструктивных типов судов.

Как известно, для предварительной оценки водоизмещения пассажирского судна на начальной стадии проектирования можно использовать коэффициент утилизации водоизмещения по «чистому» дедвейту (без запасов топлива) [6]

$$\eta_{DW_0} = \frac{DW^0}{D_{гр}}, \quad (1)$$

где η_{DW_0} — коэффициент утилизации по чистому дедвейту; DW^0 — чистый дедвейт; $D_{гр}$ — полное водоизмещение судна.

График зависимости коэффициента утилизации по дедвейту от количества пассажиров приведен на рис. 1.

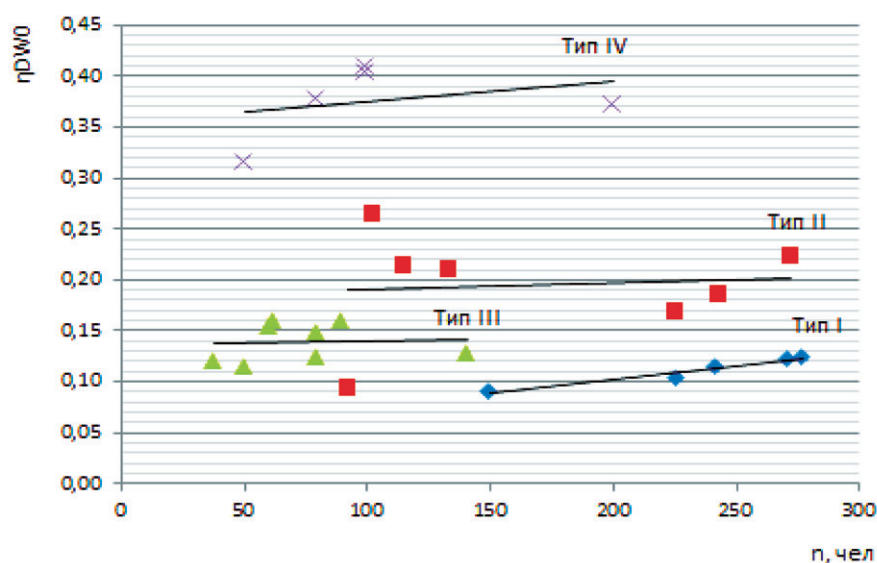


Рис. 1. Зависимость коэффициента утилизации водоизмещения от пассажироместимости судна $\eta_{DW_0} = f(n)$

Влияние количества пассажиров на величину водоизмещения можно проследить на рис. 2.

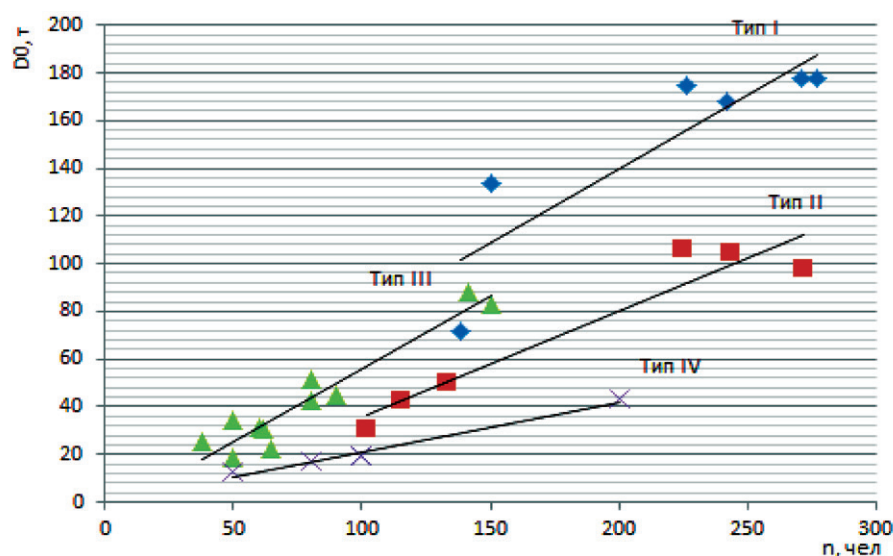


Рис. 2. Зависимость величины D_0 от количества пассажиров $D_0 = f(n)$

Величина D_0 , во избежание влияния автономности, представлена в виде

$$D_0 = D_{\text{пор}} + DW_0, \quad (2)$$

где DW_0 — чистый дедвейт, т; $D_{\text{пор}}$ — вес порожнего судна, т.

Анализируя зависимости, представленные на рис. 1 и 2, можно сделать следующие выводы:

- коэффициент утилизации η_{DW_0} и величина D_0 с ростом пассажиров линейно растут;
- в зависимости от выделенных ранее конструктивных типов пассажирских судов, видно, что наиболее высокий коэффициент утилизации у судов IV типа, а наиболее низкий у I типа. Такое поведение обусловлено тем, что при одинаковой пассажировместимости у судов с меньшим количеством палуб для размещения пассажиров и более легкой надстройкой собственная масса уменьшается;
- верхние значения для судов типа III обусловлены, прежде всего, высокой массой корпуса при относительно невысоких показателях пассажировместимости, что свойственно судам довоенной постройки (заложены большие толщины обшивки и набора, клепаное соединение деталей) либо современным судам, когда толщины закладываются на более высокий класс;
- разница по водоизмещению между судами типа I и II составляет от 17 до 89 %, а между III и IV типом от 50 до 70 %.

Главные размерения отражают особенности судна, обусловленные требованиями, выдвигаемыми техническим заданием и ограничениями, связанными с обеспечением остойчивости, непотопляемости, ходкости, условиям эксплуатации и т. д. [7], [8]. Для пассажирских судов главные размерения и, как следствие, многие навигационные и эксплуатационно-технические качества связаны с выполнением требований по пассажировместимости. Исходя из этого, определение главных размерений на начальной стадии проектирования следует рассматривать в зависимости, прежде всего, от пассажировместимости судна.

На рис. 3 – 6 приведены зависимости расчетной длины, ширины, высоты борта и осадки.

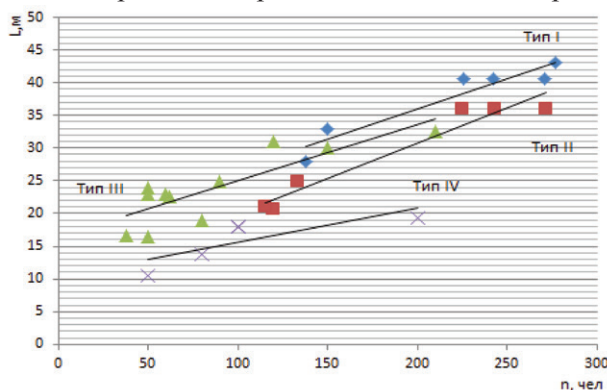


Рис. 3. Зависимость расчетной длины судна от пассажировместимости $L = f(n)$

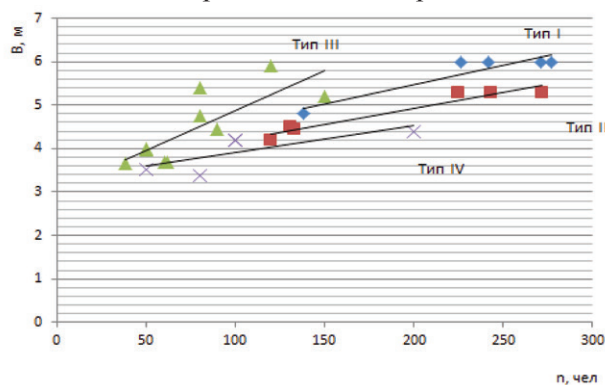


Рис. 4. Зависимость расчетной ширины судна от пассажировместимости $B = f(n)$

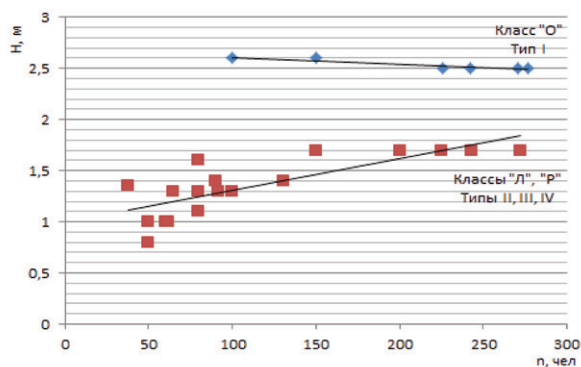


Рис. 5. Зависимость расчетной высоты борта от пассажировместимости $H = f(n)$

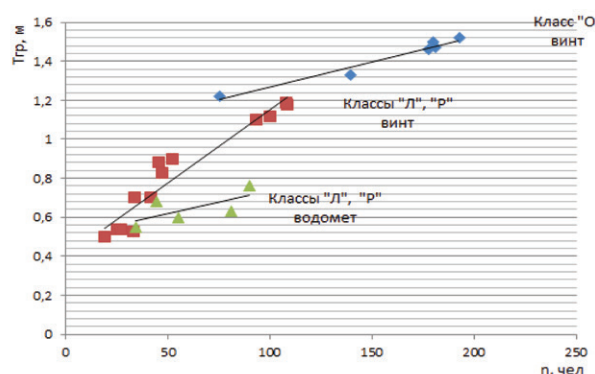


Рис. 6. Зависимость осадки судна в грузу от пассажировместимости $T_{\text{гр}} = f(n)$

Проводя анализ полученных зависимостей главных размерений «малых» пассажирских судов, можно сделать следующие выводы.

Расчетные длина и ширина судна, осадка в грузу при увеличении пассажировместимости линейно растут. Зависимость описывается выражением

$$y = a \cdot x + b, \quad (3)$$

коэффициенты и показатели корреляции представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Параметры линейных регрессионных зависимостей судовых элементов в функции от пассажировместимости, n , чел.

Параметр	Тип I			Тип II		
	L , м	B , м	H , м	L , м	B , м	H , м
a	0,092	0,009	$0,7 \cdot 10^{-3}$	0,11	0,007	0,003
b	17,6	3,7	2,7	8,3	3,5	0,99
R^2	0,9	0,86	0,88	0,9	0,9	0,63
Параметр	Тип III			Тип IV		
	L , м	B , м	L , м	B , м	L , м	B , м
a	0,086	0,019	0,086	0,019	0,086	0,019
b	16,4	3,02	16,4	3,02	16,4	3,02
R^2	0,7	0,64	0,7	0,64	0,7	0,64

Таблица 2

Параметры линейных зависимостей для определения осадки судна в грузу $T_{гр}$, м, в функции от пассажировместимости, n , чел.

Параметр	«О»		«Л», «Р»	
	винт	водомер	винт	водомер
a	$2,6 \times 10^{-3}$	—	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$
b	1,01	—	0,4	0,5
R^2	0,96	—	0,92	0,5

Влияние архитектурно-конструктивного типа на длину судна обусловлено несколько отличным перечнем жилых и служебных помещений и условиями размещения пассажиров. Для судов I и II типов разница по их длине составляет от 43 до 54 %. Длина судов III типа, где пассажиры размещаются только на палубе трюма, в среднем на 40 %.

Значения расчетной ширины судна лежат в диапазоне 4 – 6 м, что обусловлено многими параметрами: количеством и расположением пассажирских мест (рядностью кресел), вальностью силовой установки, условиями обеспечения остойчивости судна.

Так ширина судов I типа на 15 – 17 % больше ширины судов II типа, что обусловлено при одинаковой вальности и рядности наличием прогулочных проходов на главной палубе.

Двухвальная энергетическая установка приводит к увеличению ширины судна в среднем на 20 %.

При выборе осадки судна необходимо учитывать несколько факторов, влияющих на данную величину: тип движителя, район эксплуатации, дедвейт и т.д. Как видно из графика на рис. 6, для судов класса «О», имеющих большее водоизмещение, осадка в грузу лежит в верхнем диапазоне. Для судов классов «Л» и «Р», оборудованных винтами, диапазон величин осадок достаточно ши-

рок, что свидетельствует о многофакторном подходе при выборе данной величины. Для судов с установленными водометными движителями, осадки в грузу имеют невысокие значения.

Высота борта выбирается, прежде всего, исходя из требований обеспечения достаточной высоты помещений в корпусе, а также требований Российского Речного Регистра к достаточному надводному борту.

Представляет интерес определение главных размерений судна от водоизмещения D_0 , описываемого формулой (2) [9]. Полученные графики показаны на рис. 7 – 10, соответствующие регрессионные формулы приведены в табл. 3. Для данного случая зависимости выявлены в общем виде, и они имеют нелинейный характер:

$$y = a \cdot x^b, \quad (4)$$

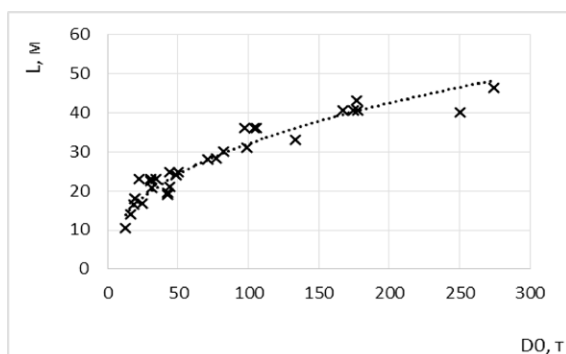


Рис. 7. Зависимость расчетной длины судна от величины D_0

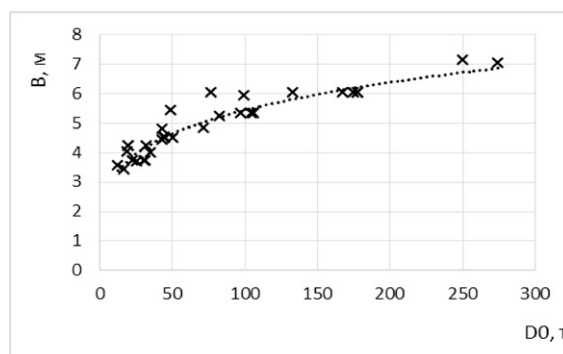


Рис. 8. Зависимость расчетной ширины судна от величины D_0

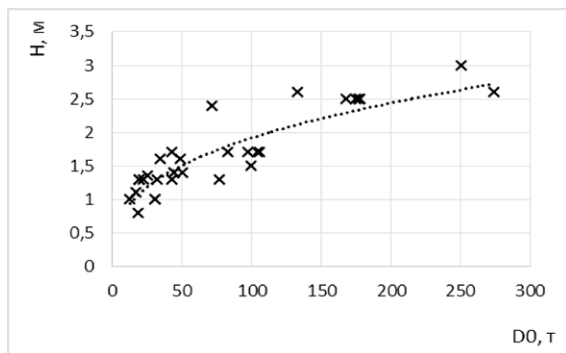


Рис. 9. Зависимость расчетной высоты борта от величины D_0

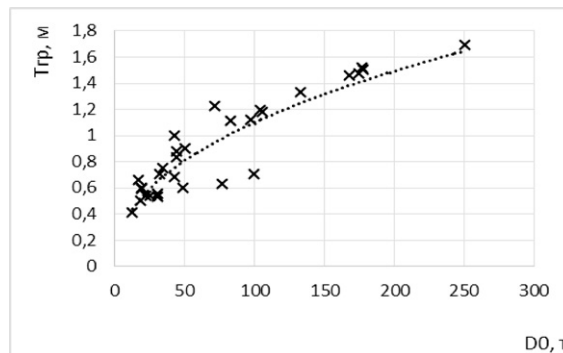


Рис. 10. Зависимость осадки судна в грузу от величины D_0

Таблица 3

**Параметры степенных регрессионных зависимостей
для определения судовых элементов в функции от величины D_0**

Параметр	L , м	B , м	H , м	$T_{гр}$, м
a	4,97	1,9	0,39	0,14
b	0,405	0,23	0,35	0,44
R^2	0,91	0,88	0,77	0,81

На начальной стадии проектирования определение мощности силовой установки возможно с использованием двухкомпонентной формулы [10], [11]

$$N = \frac{D^n \cdot v^m}{C_{nm}}, \quad (5)$$

где N — мощность энергетической установки, кВт; D — водоизмещение судна, т; v — эксплуатационная скорость, м/с; C — постоянный коэффициент; n, m — числовые значения степеней при водоизмещении и скорости соответственно.

При анализе данных пассажирских судов, оборудованных в качестве движителя винтом, была получена зависимость, отраженная на графике рис. 11.

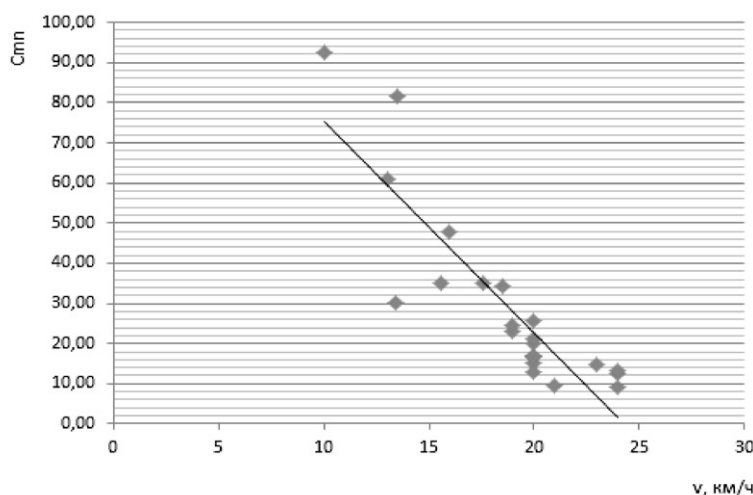


Рис. 11. Зависимость коэффициента C_{nm} от скорости хода судна v , км/ч

Данному графику соответствует следующий вид формулы адмиралтейского коэффициента:

$$N = \frac{D^{0,67} \cdot v^{3,5}}{C_{nm}}. \quad (6)$$

Адмиралтейский коэффициент представляется регрессионной формулой

$$C_{nm} = 5,3v + 127,7. \quad (7)$$

В ходе анализа статистических зависимостей элементов и характеристик «малых» пассажирских судов можно сделать следующие выводы:

- зависимости проектных характеристик в функции от заданной пассажировместимости носят линейный характер;
- зависимость главных размерений от полного водоизмещения изменяются нелинейно в соответствии с формулой (4);
- значение адмиралтейского коэффициента с ростом скорости линейно убывает.

Параметры регрессионных зависимостей для определения судовых элементов приведены в табл. 1 – 3. Выявленные зависимости могут быть использованы при оптимизации данного типа судов.

Дальнейшее решение задачи по созданию методики проектирования корпуса малого речного пассажирского судна необходимо вести в направлении уточнения зависимости главных размерений от мореходных качеств, вместимости и нагрузки масс.

Список литературы

1. Бронников А. В. Разработка основных технико-эксплуатационных требований на проектирование морского судна: учеб. пособие / А. В. Бронников. — СПб.: Судостроение, 1997. — 217 с.

2. *Papanikolaou A.* Methodologies of Preliminary Design / A. Papanikolaou. — Dordrecht: Springer, 2014. — 628 p.
3. *Schneekluth H.* Ship Design for Efficiency and Economy / H. Schneekluth, V. Bertram. — Oxford: Butterworth-Hainemann, 1998. — 227 p.
4. *Роннов Е. П.* Перспективы создания судов с автономным электрическим двигателем / Е. П. Роннов, Е. В. Купальцева // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2014. — № 40. — С. 107–110.
5. *Гайкович А. И.* Основы теории проектирования сложных технических систем / А. И. Гайкович. — СПб.: ТОО-Моринтех, 2001. — 432 с.
6. *Вашедченко А. Н.* О точности оценки водоизмещение судна в начале проектирования / А. Н. Вашедченко, Чан Ван Налим // Сб. науч. работ НУК. — 2007. — № 4 (415). — С. 3–7.
7. *Boccolini V.* Some data and techniques suitable for the conceptual and preliminary design of high-speed ferries / V. Boccolini, T. Coppola // 2-nd international conference on marine research and transportation. — 2007. — Session A. — P. 159–166.
8. *Ray T.* A global optimization model for ship design / T. Ray, R. P. Gokarn, O. P. Sha // Computers in Industry. — 1995. — № 26. — P. 175–192.
9. *Жибоедов В. В.* Статистический метод выбора главных размерений малых морских судов / В. В. Жибоедов, А. В. Кузьмина, А. И. Раков // Вестник СевГТУ. — 2008. — Вып. № 85. — С. 140–145.
10. *Раков А. И.* Определение мощности главных механизмов проектируемого судна по двухкомпонентным формулам / А. И. Раков, А. В. Кузьмина, В. В. Жибоедов // Вісник СевДТУ. — 2009. — Вип. 97: Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. — С. 141–143.
11. *Панкова О. В.* К определению мощности энергетической установки на начальных стадиях проектирования судна / О. В. Панкова // Зб. наук. праць НУК. — 2007. — № 3 (414). — С. 32–38.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 629.063.7

Б. А. Авдеев,
асп.;

Е. П. Масюткин,
канд. техн. наук, проф.;

В. И. Просвирнин,
д-р техн. наук, проф.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ В КРИВОЛИНЕЙНОМ ПОТОКЕ В МАСЛЯНЫХ СИСТЕМАХ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

MODELING OF COAGULATION PROCESS IN THE CURVILINEAR FLOW IN THE OIL SYSTEM OF SHIP POWER PLANTS

Разработана модель коагуляции частиц в рабочей камере гидроциклов с радиальным магнитным полем, в основу которой положен подход Лагранжа. В качестве сил, действующих на частицы, рассматривались силы коагуляции, центробежная и сила сопротивления среды как наиболее существенные. Модель выполнена в цилиндрической системе координат как наиболее удобная в использовании для аппаратов очистки вязких сред инерционного типа. Механизм коагуляции описан и проиллюстрирован. Математическая модель была численно решена при заданных параметрах, результаты решения системы дифференциальных уравнений представлены в виде проекции графиков. Помимо траекторий движения и времени коагуляции было рассчитано расстояние между коагулирующими частицами. Показано, что магнитное поле способствует процессу флокулообразования, что, в свою очередь, увеличивает центробежную силу в гидроциклоне, вследствие чего степень очистки возрастает.

The model of the coagulation of particles in the operation chamber of watercrafts (hydrocycles) with a radial magnetic field has been developed. It is based on the Lagrangian approach. As the forces acting on the particles, there were considered coagulation forces, centrifugal force and resistance of the medium as the most significant. The model is performed in a cylindrical coordinate system as the most convenient for devices to use for the treatment of viscous fluid inertial type. Coagulation mechanism is described and illustrated. A mathematical model was numerically solved for the given parameters; the results of solving a system of differential equations are presented in the form of a projection graphs. In addition to the trajectories and the coagulation time the distance between the particles coagulating was calculated. It is shown that the magnetic field promotes coagulation process, which in turn increases the centrifugal force in a hydrocyclone, and as a result increases the degree of purification.

Ключевые слова: математическая модель, магнитный гидроциклон, коагуляция.

Key words: mathematical model, magnetic hydrocyclone, coagulation.

Введение

В статье приведена математическая модель коагуляции двух частиц в рабочей зоне гидроциклонов с радиальным магнитным полем, выполненная в цилиндрической системе координат. Несмотря на то, что циклоны и гидроциклоны используются повсеместно, в настоящее время не существует приемлемой и точной модели кинетики частиц в криволинейном потоке.

Анализ современных судовых энергетических установок показывает, что вопросы, связанные с повышением эффективности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) до сих пор актуальны. Основным типом двигателя на всех современных судах как речного, так и морского флота, является ДВС, при этом годовые расходы на горюче-смазочные материалы могут превышать стоимость

самого дизеля в несколько раз. В связи с тем, что потери мощности на износ при неправильной эксплуатации составляют в среднем 15 – 20 %, процесс регенерации масел является одним из важнейших и неотложных на водном транспорте, поскольку если вовремя не выполнить замену моторного масла, то износ ДВС увеличится на 150 – 200 % [1].

Существуют четыре базовых метода механической очистки технических жидкостей: гравитационный, инерционный, ситовый и сепарационный (под действием внешнего воздействия). В связи с тем, что наиболее опасными примесями в моторном масле выступают продукты износа, которые по своей природе являются ферромагнитными, эффективность очистки железосодержащих дисперсных сред может интенсифицироваться путем наложения магнитного поля на известные устройства [2].

Механические примеси большого размера в неочищенной вязкой среде легко удаляются с помощью известных методов очистки. Однако большая часть примесей является мелкими дисперсными частицами, которые ввиду малого размера плохо поддаются извлечению традиционными способами [3]. Поэтому возникла необходимость применять специальные или комбинированные методы очистки. Одним из наиболее перспективных является наложение полей электрической природы, где коагуляция в значительной степени повышает эффективность очистки.

Коагуляция — процесс объединения мелких частиц в более крупные под действием сил сцепления. Маленькие частицы объединяются в большие агломераты, называемые *флокулами*, которые можно значительно легче извлечь из вязких сред.

В качестве примера успешного применения магнитных полей с традиционными методами очистки может служить *магнитный гидроциклон*. Существуют различные конструкции этих аппаратов, однако наибольшую популярность получил гидроциклон с радиальным магнитным полем, приведенный на рис. 1, с принципом действия и конструкцией которого подробно можно ознакомиться в [4].

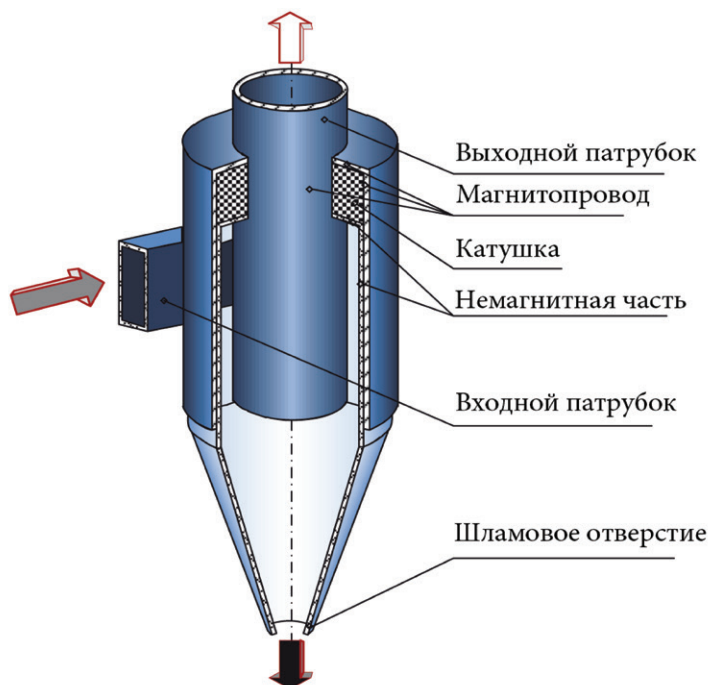


Рис. 1. Гидроциклон с радиальным магнитным полем

Динамике частиц в рабочей камере циклонов и гидроциклонов посвящен ряд исследований. Успехи в области моделирования движения сплошной среды неоспоримы без наложения магнитного поля [5] – [8]. Однако процесс коагуляции или полностью отсутствует, или носит эмпирический характер и определяется с помощью экспериментально найденных поправочных коэффици-

ентов, применить которые можно только к конкретным аппаратам. Ранее была разработана модель коагуляции двух частиц в криволинейном потоке, выполненная в полярных координатах, однако и она требует дальнейшего совершенствования [9]. Так как процесс сепарации в рабочей камере гидроциклона является сложным и не поддается полностью аналитическому или теоретическому решению, прибегнем к некоторым допущениям, аналогично изложенным в [10]:

- процесс является установившимся;
- осредненная скорость движения жидкости постоянна по времени и по сечению;
- среда не реагентоспособна;
- не учитывается отскок частиц от стенок гидроциклона;
- не учитывается тепловая (броуновская) коагуляция частиц в гидроциклоне;
- не учитывается влияние турбулентных пульсаций скорости на движение частицы.

Основная часть

Рассмотрим случай, когда две коагулирующие частицы имеют следующие координаты: первая частица — $(R_1; \theta_1; Z_1)$, вторая — $(R_2; \theta_2; Z_2)$, причем $R_1 \neq R_2$, $\theta_1 \neq \theta_2$, $Z_1 \neq Z_2$ (рис. 2 а).

Расстояние между двумя коагулирующими частицами в цилиндрической системе координат выразим из теоремы косинусов:

$$S = \sqrt{s^2 + z^2}; \quad z = Z_2 - Z_1; \quad (1)$$

$$s^2 = R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2).$$

Разложим F_F на тангенциальную, радиальную и аксиальную составляющие (рис. 2 б, в):

$$\begin{aligned} F'_{F1} &= -F_F \cdot \cos \alpha_1; & F'_{F2} &= -F_F \cdot \sin \alpha_2; \\ F_{FR1} &= -F'_{F1} \cdot \cos \varphi_1; & F_{FR2} &= -F'_{F2} \cdot \cos \varphi_2; \\ F_{F\theta1} &= F'_{F1} \cdot \sin \varphi_1; & F_{F\theta2} &= -F'_{F2} \cdot \sin \varphi_2; \\ F_{FZ1} &= F_F \cdot \sin \alpha_1; & F_{FZ2} &= F_F \cdot \cos \alpha_2. \end{aligned} \quad (2)$$

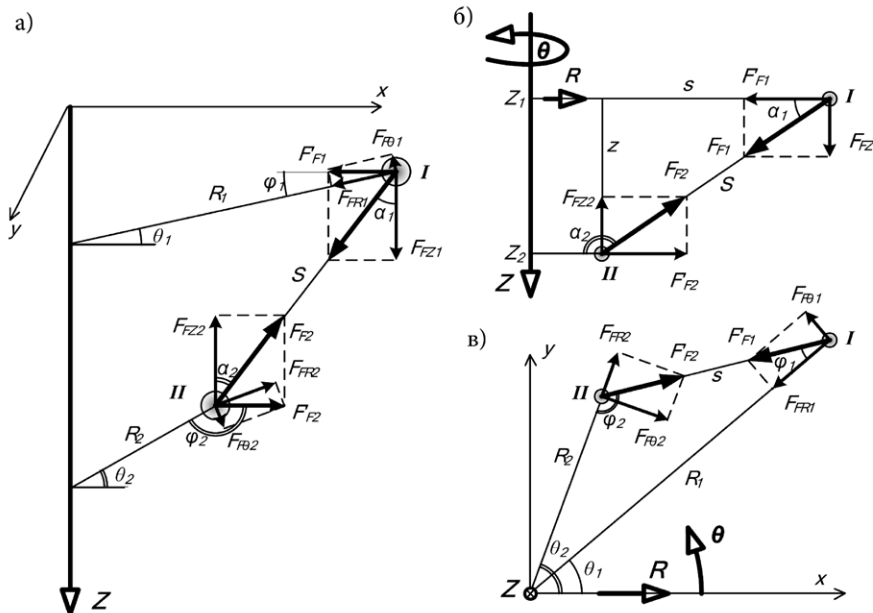


Рис. 2. Коагуляция частиц в рабочей камере магнитного гидроциклона (а), проекции по осям (б), (в)

Значения $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$ могут быть выражены из теоремы косинусов, значения $\cos \alpha_1$, $\cos \alpha_2$ — из теоремы Пифагора:

$$\begin{aligned}\sin \alpha_1 &= \cos \alpha_2 = \frac{z}{S}; \quad \cos \alpha_1 = \sin \alpha_2 = \frac{s}{S}; \\ \cos \varphi_1 &= \frac{R_2 - R_1 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)}{s}; \quad \sin \varphi_1 = \frac{R_1 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)}{s}; \\ \cos \varphi_2 &= \frac{R_1 - R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)}{s}; \quad \sin \varphi_2 = \frac{R_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)}{s}.\end{aligned}\quad (3)$$

Сила коагуляции для шарообразных частиц может быть представлена в следующем виде [2]:

$$F_F = \frac{\pi^3 \cdot \mu_0 \cdot d_1^2 \cdot d_2^2 \cdot H_1 \cdot H_2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{9S^2}, \quad (4)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; H_1, H_2 — напряженности магнитного поля для каждой частицы соответственно, А/м; d_1, d_2 — диаметры сферических частиц, м; α_1, α_2 — магнитные восприимчивости, о. е.

Для расчета магнитной силы и определения напряженности поля в конкретной точке магнитного гидроциклона воспользуемся регрессионной моделью распределения поля по радиусу и высоте [11]:

$$H(R, Z) = \left[H_A + (H_0 - H_A) \cdot e^{-\frac{Z \cdot n_z}{h_c}} \right] \cdot \left(\frac{D_0}{2 \cdot R} \right)^{n_R},$$

где H_0, H_A — напряженность поля в верхней и нижней точке рабочей камере гидроциклона соответственно, А/м; h_c — высота цилиндрической части гидроциклона, м; D_0 — диаметр выходного патрубка, м; n_z, n_R — поправочные коэффициенты, служащие для более точного воспроизведения напряженности поля в рабочей камере аппарата, о. е.

Подставив значения радиальной, тангенциальной и аксиальной составляющих силы коагуляции (1) – (4) в уравнения движения частиц [9], получим математическую модель процесса коагуляции частиц в гидроциклоне с радиальным магнитным полем в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 R_1}{dt^2} &= R_1 \cdot \left(\frac{d\theta_1}{dt} \right) - A_1 \cdot \frac{dR_1}{dt} - B_1 \cdot H_1 \cdot dH_{R1} + E_1 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \varphi_1}{S^2}; \\ \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} &= -\frac{2}{R_1} \frac{d\theta_1}{dt} \cdot \frac{dR_1}{dt} + A_1 \cdot \left(U_\theta - R_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} \right) - E_1 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \varphi_1}{S^2}; \\ \frac{d^2 Z_1}{dt^2} &= g + A_1 \cdot \left(U_z - \frac{dZ_1}{dt} \right) - B_1 \cdot H_1 \cdot dH_{Z1} + E_1 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \sin \alpha_1}{R^2}; \\ \frac{d^2 R_2}{dt^2} &= R_2 \cdot \left(\frac{d\theta_2}{dt} \right) - A_2 \cdot \frac{dR_2}{dt} - B_2 \cdot H_2 \cdot dH_{R2} + E_2 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2}{S^2}; \\ \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} &= -\frac{2}{R_2} \frac{d\theta_2}{dt} \cdot \frac{dR_2}{dt} + A_2 \cdot \left(U_\theta - R_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} \right) + E_1 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2}{S^2}; \\ \frac{d^2 Z_2}{dt^2} &= g + A_2 \cdot \left(U_z - \frac{dZ_2}{dt} \right) - B_2 \cdot H_2 \cdot dH_{Z2} + E_2 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \cos \alpha_2}{S^2}; \\ A_i &= \frac{18\mu\varphi_{wi}^2}{d_i^2 \cdot C_K \cdot (\rho_i - 0,5\rho_f)}; \quad B_i = \frac{\mu_0 \cdot \alpha_i}{(\rho_i - 0,5\rho_f)}; \\ E_1 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \mu_0 \cdot d_2^2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{d_1 \cdot \rho_1}; \quad E_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \mu_0 \cdot d_1^2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{d_2 \cdot \rho_2}; \\ H_i &= \left[H_A + (H_0 - H_A) \cdot e^{-\frac{Z_i \cdot n_z}{h_c}} \right] \cdot \left(\frac{D_0}{2 \cdot R_i} \right)^{n_R}.\end{aligned}\quad (5)$$

$$dH_{Ri} = \frac{\partial H_i}{\partial R} = - \left[H_A + (H_0 - H_A) \cdot e^{-\frac{Z_i n_Z}{h_C}} \right] \cdot \left(\frac{D_0}{2} \right)^{n_R} \cdot \frac{n_R}{R_i^{n_R+1}};$$

$$dH_{Zi} = \frac{\partial H_i}{\partial Z} = - \frac{n_Z}{h_C} \cdot (H_0 - H_A) \cdot e^{-\frac{Z_i n_Z}{h_C}} \cdot \left(\frac{D_0}{2 \cdot R_i} \right)^{n_R};$$

$$S = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2) + (Z_2 - Z_1)^2},$$

где μ — коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; φ_W — коэффициент несферичности частицы, о. е.; C_K — коэффициент коррекции Коннингема, о. е.; ρ_i, ρ_f — плотность частиц и вязкой среды соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; i — индекс частицы; U_θ, U_Z — соответственно тангенциальная и аксиальная скорость движения жидкости, $\text{м}/\text{с}$; g — ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; dH_{Ri}, dH_{Zi} — частные производные напряженности поля [6], соответственно, по осям R и Z , $\text{А}/\text{м}^2$.

Система уравнений (5) решалась численным методом с помощью MathCAD 2001 для частных случаев (рис. 3): частицы — железо; $d_1 = d_2 = 50 \text{ мкм}$; среда — масло; $H_0 = 4 \cdot 10^4 \text{ А}/\text{м}$; $U_R = 0 \text{ м}/\text{с}$; $U_\theta = 2 \text{ м}/\text{с}$; $U_Z = 0,5 \text{ м}/\text{с}$; $D_0 = 0,05 \text{ м}$; $D = 0,1 \text{ м}$; $h_C = 0,2 \text{ м}$.

Начальные условия: $R_{10} = 0,036 \text{ м}$; $R_{20} = 0,033 \text{ м}$; $\theta_{10} = 1,8 \text{ рад}$; $\theta_{10} = 1,75 \text{ рад}$; $Z_1 = 0 \text{ м}$; $Z_2 = 0,002 \text{ м}$; $v_{R10} = v_{R20} = 0 \text{ м}/\text{с}$; $v_{\theta10} = v_{\theta20} = 2 \text{ м}/\text{с}$; $v_{Z10} = v_{Z20} = 0,5 \text{ м}/\text{с}$.

Граничными условиями является момент соударения частиц, т. е. процесс протекает до тех пор, пока удовлетворяется условие ρ_i, ρ_f .

Следует отметить, что на рис. 3 приведены абсолютные разности между координатами:

$$\Delta R = R_1 - R_2; \Delta \theta = \theta_1 - \theta_2; \Delta Z = Z_2 - Z_1.$$

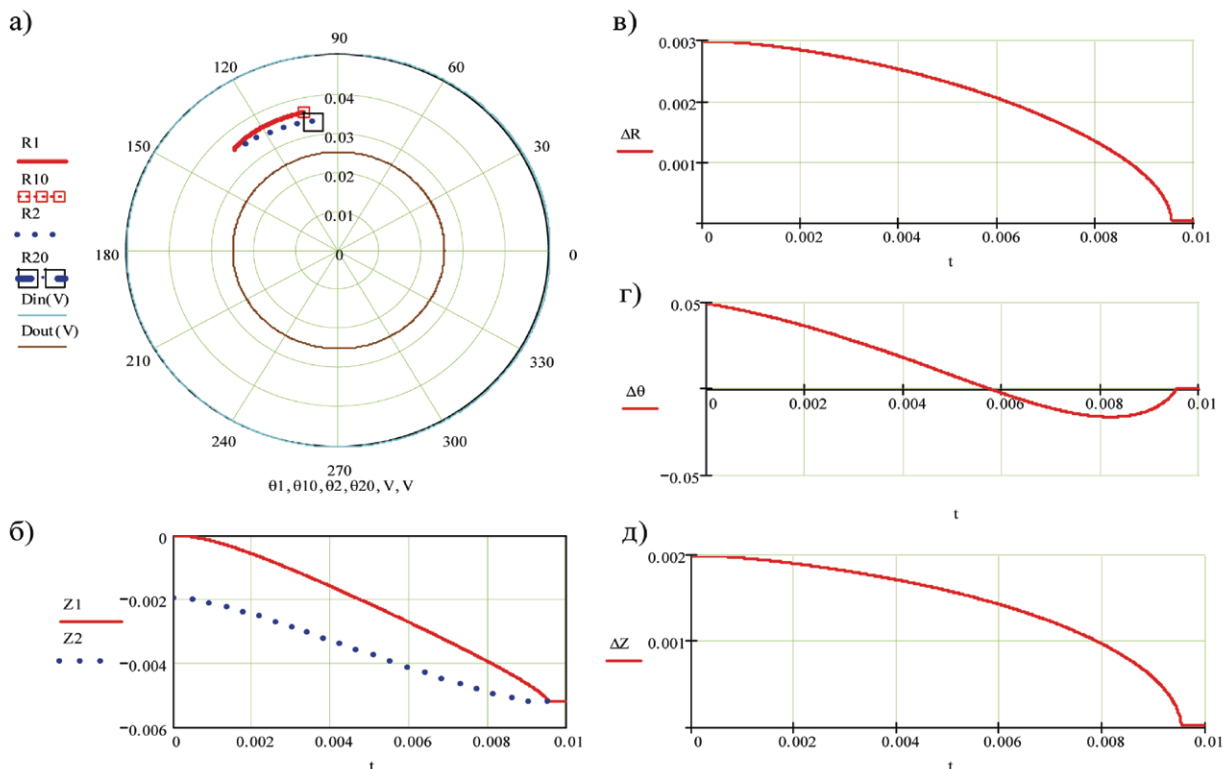


Рис. 3. Результаты численного исследования математической модели процесса коагуляции двух частиц в рабочей камере гидроциклона (а, б) и разница между радиальными (в), тангенциальными (г) и аксиальными (д) составляющими

Выводы

1. Составлена математическая модель, описывающая коагуляции двух частиц в рабочей камере гидроциклона с радиальным магнитным полем в цилиндрической системе координат на основании подхода Лагранжа.
2. Данная математическая модель была решена численным методом при заданных условиях.
3. Магнитное поле способствует процессу флокулообразования, что, в свою очередь, увеличивает центробежную силу в гидроциклоне, вследствие чего степень очистки возрастает.

Список литературы

1. *Возницкий И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания: в 2 т. / И. В. Возницкий. — Т. 2. — М.: Моркнига, 2008. — 282 с.
2. *Александров Е. Е.* [и др.]. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей: монография / Е. Е. Александров, И. А. Кравец, Е. Н. Лысиков [и др.]. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. — 544 с.
3. Судовой механик: справочник / под ред. А. А. Фока. — Т. 2. — Одесса: Феникс, 2010. — 1032 с.
4. *Масюткин Е. П.* Очистка технических жидкостей от магнитных примесей в инфраструктуре водного транспорта / Е. П. Масюткин, В. И. Просвирнин, Б. А. Авдеев // Рыбное хозяйство Украины. — Керчь: КГМТУ, 2012. — № 3 (80). — С. 40–49.
5. *Svarovsky L.* Solid-Liquid Separation / L. Svarovsky. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. — 569 p.
6. *Zhang L.* CFD numerical simulation of Archimedes spiral inlet hydrocyclone / L. Zhang, L. Wei, B. H. Chang, ets. // 6th International Conference on Pumps and Fans with Compressors and Wind Turbines. — 2013. — P. 111–117.
7. *Capela Moraes C. A.* Turbulence Modelling in Hydrocyclone Flow / C. A. Capela Moraes, A. P. Silva Freire // Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. — ENCIT. — 2004. — P. 20–42.
8. *Зиганшин М. Г.* Расчетные параметры осаждения взвеси в аппаратах с вращательным движением мультифазных потоков. — Ч. 1. — Современные методы моделирования / М. Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин, Р. М. Гильфанов // Изв. КазГАСУ. — 2010. — № 1 (13). — С. 186–192.
9. *Авдеев Б. А.* Численное решение задачи о коагуляции двух частиц в потоке текучей среды в полярных координатах / Б. А. Авдеев, Е. П. Масюткин, В. И. Просвирнин // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — Новочеркасск, 2014. — № 4 (179). — С. 13–17.
10. *Авдеев Б. А.* Модель движения частиц в магнитном гидроциклоне / Б. А. Авдеев // Технический аудит и резервы производства. — 2013. — № 5/1 (13). — С. 36–41.
11. *Просвирнин В. И.* Модель распределения радиального магнитного поля в гидроциклоне / В. И. Просвирнин, С. П. Голиков, Б. А. Авдеев // Вестник Херсонского национального технического университета. — Херсон: ХНТУ. — 2013. — № 1 (46). — С. 300–304.

УДК 629.12, 697.9

В. А. Шабанов,
ст. преп.;

А. К. Наумова,
зав. сектором;

К. А. Васильев,
асп.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАПЛАСИАНА ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИЗУАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ИЗ КОМПОЗИТОВ

THE USE OF LAPLACIAN FILTERING IMAGES FOR THE VISUAL EVALUATION OF SURFACE ELEMENTS OF SHIPBOARD VENTILATION OF COMPOSITES

В статье рассмотрены проблемы, возникающие при изготовлении и эксплуатации судовой системы вентиляции, элементы которой выполнены из современных композиционных полимерных материалов. Отдельно отмечены эксплуатационные показатели качества поверхностного слоя деталей воздухопроводов в виде показателей шероховатости, которые оказывают влияние на энергетические потери и сопротивление воздушному потоку в системе судовой вентиляции. Предложен новый подход к методу оценки комплексного критерия шероховатости методом визуального мониторинга исследуемой поверхности и последующей математической обработки цифрового видеосигнала. Приведен анализ различных методов математической обработки и фильтрации полученных изображений в зависимости от освещения. Проанализированы пути решения проблем оценки эксплуатационных показателей шероховатости поверхности воздухопроводов методом технического зрения.

The article considers the problems arising in the manufacture and operation of ship's ventilation system, the elements of which are made of modern composite polymer materials. Separately marked operational indicators of the quality of the surface layer of air channels in the form of roughness indicators that have an impact on energy losses and the resistance to air flow in the ventilation system of marine. We propose a new approach to the evaluation of integrated criterion of roughness by visual monitoring of surface and subsequent mathematical processing of the digital video signal. The analysis of the various methods of mathematical processing and filtering of the received images based on lighting. Analyzed the solutions to the problems of evaluation of performance of the roughness of the surface of the duct method technical vision.

Ключевые слова: судостроение, система вентиляции, трубопровод, композиционный полимерный материал, шероховатость поверхности, показатель качества, микрогеометрия поверхности, видео-сигнал, обработка сигнала, математическое преобразование сигнала.

Key words: shipbuilding, ventilation, plumbing, composite polymeric material, the surface roughness, the quality indicator microgeometry of the surface, video signal, signal processing, mathematical conversion signal.

Введение

В современном судостроении (в частности, системах судовой вентиляции) находят широкое применение композиционные полимерные материалы [1], [2], которые, благодаря своим уникальным физико-механическим характеристикам, могут стать достойными конкурентами традиционно используемым для этих целей металлам и их сплавам. Однако, в силу своего особого строения — армирующего каркаса, выполненного из углеродного или стекловолокна и полимерного связующего — матрицы, возникают трудности как на этапах изготовления изделий из полимерных композиционных материалов, так и их эксплуатации. Из теории проектирования судовых вентиляционных и аспирационных систем известно [3] – [5], что существенное влияние на эффек-

тивную работу системы вентиляции оказывают эксплуатационные показатели качества поверхностей деталей, непосредственно соприкасающихся с газовой и транспортируемой средой.

Постановка задачи для исследований

Для оценки технического состояния судовой вентиляционной системы важно оценить потери давления на трение пылевоздушного потока в воздуховоде с учетом концентрации смеси в воздуховоде.

На практике для оценки потерь можно использовать формулу Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta p_{\text{тр}} = l \frac{\lambda}{d} p_{\text{дин}} (1 + \mu), \quad (1)$$

где l — длина прямолинейного участка трубопровода, м; λ — коэффициент гидравлического сопротивления (трения); d — внутренний диаметр трубы, м; $p_{\text{дин}}$ — динамическое давление, исчисляемое по средней скорости воздуха и его плотности, Па; K — комплексный коэффициент (для трасс с частыми поворотами $K = 1,4$ (для трасс прямолинейных с небольшим количеством поворотов $K = K_{\text{тм}} \sqrt{\frac{d}{0,3}}$); d — диаметр трубопровода, м; $K_{\text{тм}}$ — коэффициент, учитывающий особенности транспортируемой среды с учетом твердых примесей.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ [6] – [8] в инженерных расчетах определяют по формуле А. Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где K_s — абсолютная эквивалентная шероховатость поверхности, $K_s = (0,0001 \dots 0,00015)$ м; d — внутренний диаметр трубы, м; Re — число Рейнольдса.

Число Рейнольдса для воздуха [7] можно определить по формуле

$$\text{Re} = \frac{vd\rho}{\mu_1}, \quad (3)$$

где v — средняя скорость воздуха в трубе, м/с; d — диаметр трубы, м; ρ — плотность воздуха, кг/м³; μ_1 — коэффициент динамической вязкости, Н·с/м².

Значение динамического коэффициента вязкости для воздуха находят по формуле Милликена

$$\mu_1 = 17,11845 \cdot 10^{-6} + 49,3443 \cdot 10^{-9} t, \quad (4)$$

где t — температура воздуха, °С (при $t = 16$ °С $\mu_1 = 17,11845 \cdot 10^{-6} + 49,3443 \cdot 10^{-9} \cdot 16 = 17,9 \cdot 10^{-6}$).

Из ранее приведенных зависимостей наиболее весомым для инженерных расчетов является коэффициент K_s , характеризующий эксплуатационные показатели шероховатости поверхности. Так, на основе собственных экспериментальных данных [1] и анализа исследований отдельных авторов [7], [8] данный коэффициент может вносить существенные погрешности в расчеты элементов системы аспирации и вентиляции. Погрешность по затрачиваемой мощности может составлять до 100 %. Физический смысл данного явления заключается в существенном влиянии шероховатости внутренней эксплуатационной поверхности трубопровода из композиционного полимерного материала на пропускную способность и потери в рабочем сечении. Для воздухопроводов, выполненных из металлов, влияние данного коэффициента не является столь критичным.

Из всего ранее изложенного следует, что разработка и использование экспресс методик для оценки коэффициента эквивалентной шероховатости является актуальной задачей для науки и техники. Особенностью судовых воздухопроводов является ограниченное пространство для доступа, и, соответственно, ограниченные возможности для диагностики технического состояния.

Основная часть

Способов измерения микрогеометрии функциональных поверхностей механообрабатываемых деталей судовой вентиляции разработано довольно много, однако наиболее экономически эффективными являются две основные группы: *метод контактно-щупового контроля* и *визуального мониторинга поверхностей — оптический метод*. Оба метода довольно подробно рассмотрены в работе [9]. К первой группе относятся методы, в основе которых лежит детектирование и анализ информации, полученной в результате механического взаимодействия детектирующего инструмента с исследуемой поверхностью. Вторая группа включает бесконтактные методы на основе анализа результатов взаимодействия различного рода волновых фронтов (наиболее распространенными являются световые волны) с исследуемой поверхностью.

Измерение параметров шероховатости оптическими приборами производится бесконтактными методами, среди которых наибольшее распространение получили методы светового сечения, теневого сечения, микроинтерференционные, с применением растров. Практически все известные способы контроля качества поверхности, использующие рефлектметрический метод, ориентированы на локальное применение, т. е. требуют соблюдения определенных условий. С одной стороны, отсутствие определенной универсальности накладывает ограничение на использование рефлектметрического метода, а с другой — данный метод является наименее затратным при его схемотехнической реализации с достаточно высокой чувствительностью, что, в свою очередь, открывает больше возможности для разработки различных локальных изобретательских решений. Рефлектметрический метод контроля микрогеометрии поверхностей опирается на известные физические законы взаимодействия света с контролируемой поверхностью: поглощение, отражение, распределение отраженного света в пространстве.

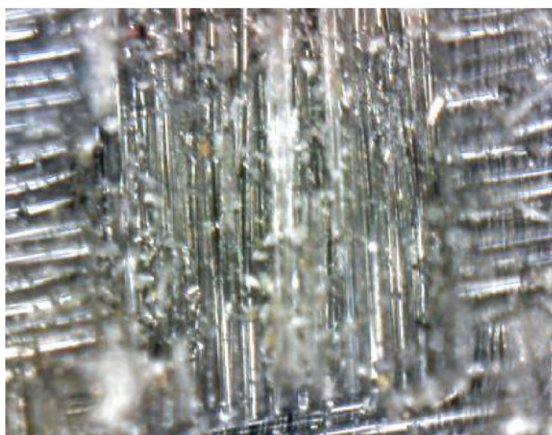
Физические свойства тела, которому принадлежит контролируемая поверхность, определяют количественные и качественные показатели отраженной и поглощенной составляющих светового потока. Микрогеометрия контролируемой поверхности задает распределение отраженного светового потока в пространстве в виде индикатрисы рассеяния. Если установить связь между параметрами микрогеометрии поверхности и характеристиками индикатрисы рассеяния, то можно сформировать измерительную информацию таким образом, что она позволит контролировать параметры шероховатости. Использование систем технического зрения позволяет не просто фиксировать интенсивность отраженного потока в рамках полусферы отражения, но и путем обработки зафиксированных фотографических изображений отфильтровывать избыточную информацию, в особенности, если учесть, что современные системы технического зрения оперируют цифровыми изображениями.

Существует большой набор стандартных фильтров для обработки цифровых изображений, которые позволяют выделить или размыть краевые эффекты, удалить шумы или подавить фон. Однако следует заметить, что используя системы технического зрения в инженерных целях, необходимо правильно комбинировать различные фильтры в зависимости от решаемой задачи. Кроме того, существенным фактом является наличие одного или нескольких изображений объекта исследования, что влияет на возможность или рамки применения различных фильтров.

Обсуждение результатов проведенных исследований

Особенность применения фильтрации для контроля композиционных материалов заключается в разнообразии видов материалов и их поверхностных свойств, что неизбежно ведет к различиям индикатрис рассеяния при идентичных условиях. Однако в пределах одного типа материала можно судить об одинаковой отражательной способности поверхностей изделий при прочих равных условиях. На рис. 1 приведены изображения двух образцов карбона, сделанные в одинаковых условиях. На микрофотографиях видна четкая структура матрицы в виде тканой сетки, заполненной пластичным связующим компонентом.

а)



б)

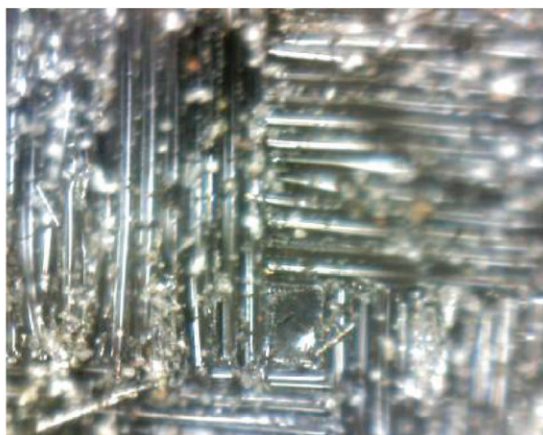


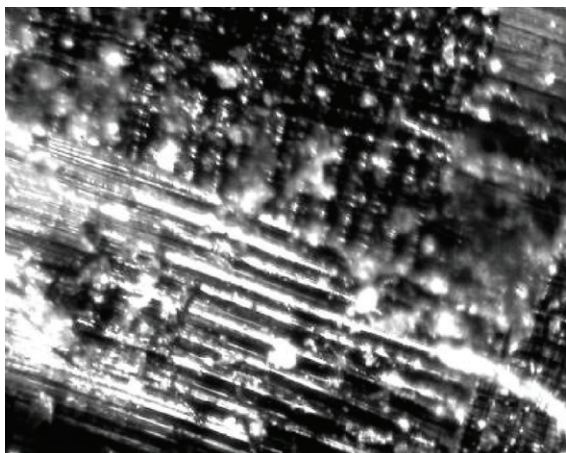
Рис. 1. Изображения задних поверхностей двух образцов воздухопровода из полимерного композиционного материала:

а — плетение «саржа» ткани УТ -900-3к со связующим ВС -2526к;

б — плетение «саржа» ткани УТ -900-3к со связующим ВС -2526к + наномодификатор «Астрален»

Необходимо заметить, что для одного и того же образца приходится учитывать возможность наличия разных типов поверхностей, как видно на рис. 2, где приведены изображения нижней стороны карбоновой пластины и ее торцевого среза. Наличие такой особенности несложно учесть при выполнении контроля и выбрать требуемый алгоритм диагностики. Главным направлением проводимых исследований является разработка алгоритмов контроля на основе одного или нескольких изображений.

а)



б)

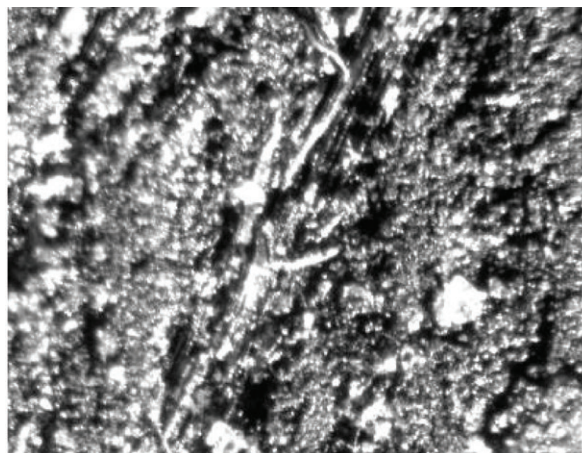


Рис. 2. Изображение необработанной поверхности воздухопровода выполненного из углепластика (плетение «саржа» ткани УТ -900-3к, со связующим ВС -2526к):
а — необработанной; б — торцевого среза образца

Основой большинства алгоритмов является выявление краев дефектов (неровностей) путем первичного сглаживания изображения с помощью Гауссова фильтра (гауссиана), который позволяет подавить шумы изображения, размывая мелкие детали, и дальнейшего дифференцирования в пространстве координат (x, y) с целью выявления градиентов яркости при использовании фильтров Лапласа (Laplacian), Собела (Sobel), Превитта (Prewitt), Робертса (Roberts), Кэнни (Canny). Такая обработка позволяет определить наиболее ярко выраженные краевые эффекты, которые обычно сопровождают поверхностные (и не только) дефекты или границы объекта, однако результат ис-

пользования стандартных фильтров не дает достаточного эффекта. На рис. 3 приведены результаты применения указанных фильтров к изображению торцевого среза карбонового образца, откуда видны дефекты (особенно крупные), но недостаточно четко прослеживается структура материала. Отчасти виновником такого результата является стандартный гауссиан с ядром свертки (табл. 1), которое незначительно размывает изображение, как показано на рис. 4.

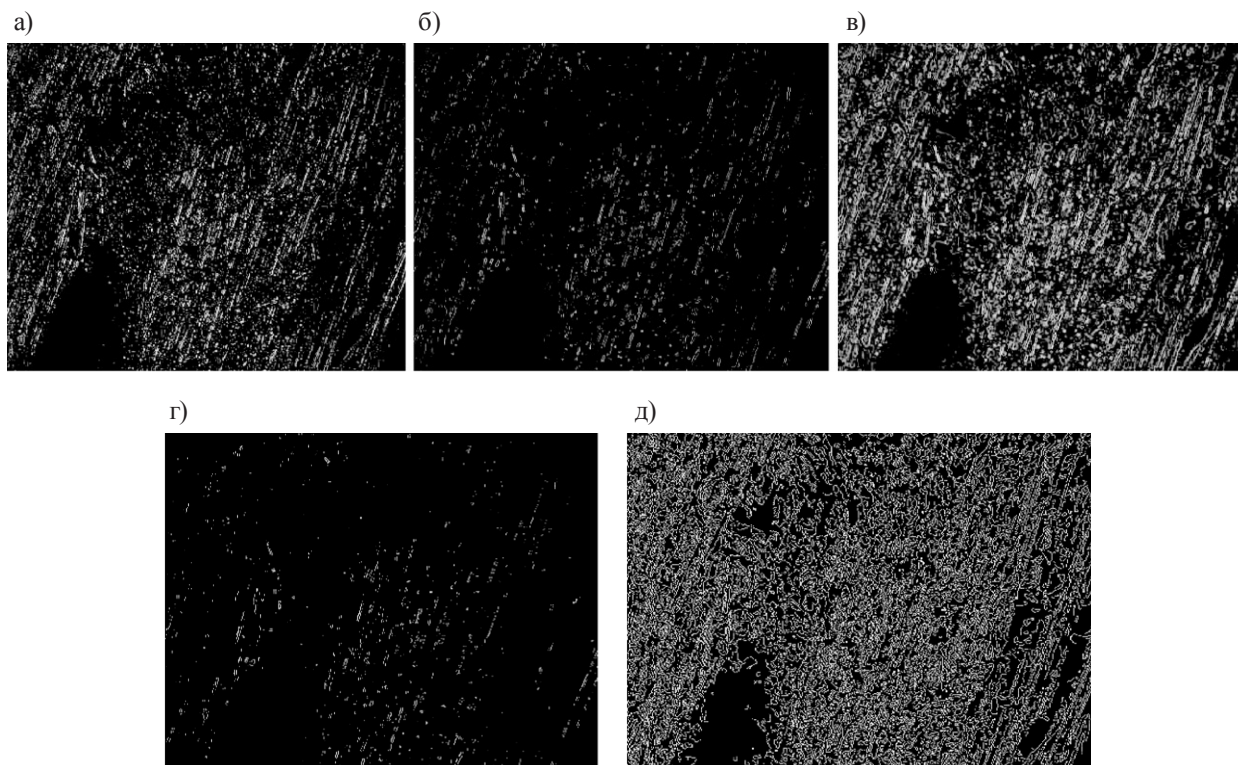


Рис. 3. Результат последовательного воздействия стандартного гауссиана и фильтров:
а — Лапласа; б — Собела; в — Превитта; г — Робертса; д — Кэнни

Таблица 1

Стандартный гауссиан с ядром свертки нахождения особых точек на изображении

1	2	1
2	4	2
1	2	1

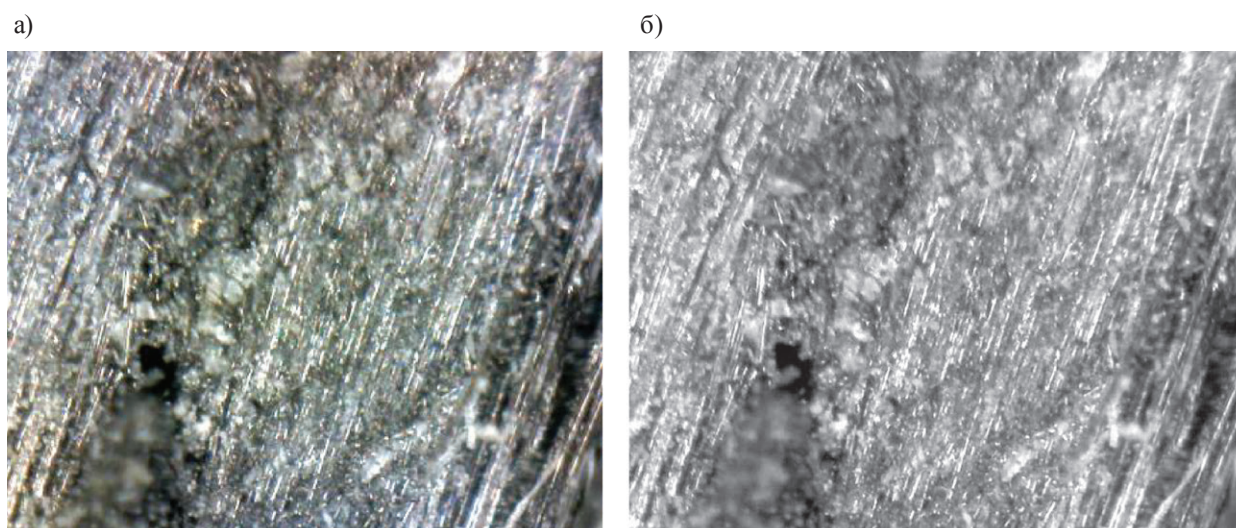


Рис. 4. Исходное изображение (а), вид после применения стандартного гауссиана (б)

Таким образом, применение *гауссиана* слабо влияет на исходное изображение и может быть исключено из процесса обработки. Остальные представленные фильтры призваны выделить границы элементов изображения по градиенту яркости, но, в результате использования, в значительной мере ослабляют общую яркость изображения, скрывая его структуру, кроме того, только Лапласиан и фильтр Кэнни используют градиенты в пределах 360° . Остальные фильтры оперируют только одним вектором направления. Фильтр Кэнни выглядит, на первый взгляд, наиболее эффективным, но при более близком рассмотрении можно увидеть избыток мелких деталей, которые скрывают текстуру изображения.

Экспериментируя с фильтром Лапласа при помощи изменения параметров ядра свертки, установили, что он может быть очень эффективен, если увеличить коэффициенты ядра и использовать дискретный делитель для полученного результата. Так, изменяя в сторону увеличения коэффициенты ядра свертки, появляется возможность усиливать влияние градиента на формирование нового значения каждого пикселя. В свою очередь, для подавления шумов введением коэффициента деления можно ослаблять изолированные мелкие детали и оставлять лишь основные контуры. На рис. 5 приведено применение фильтра Лапласа с ядром свертки (табл. 2) и увеличивающимся делителем.

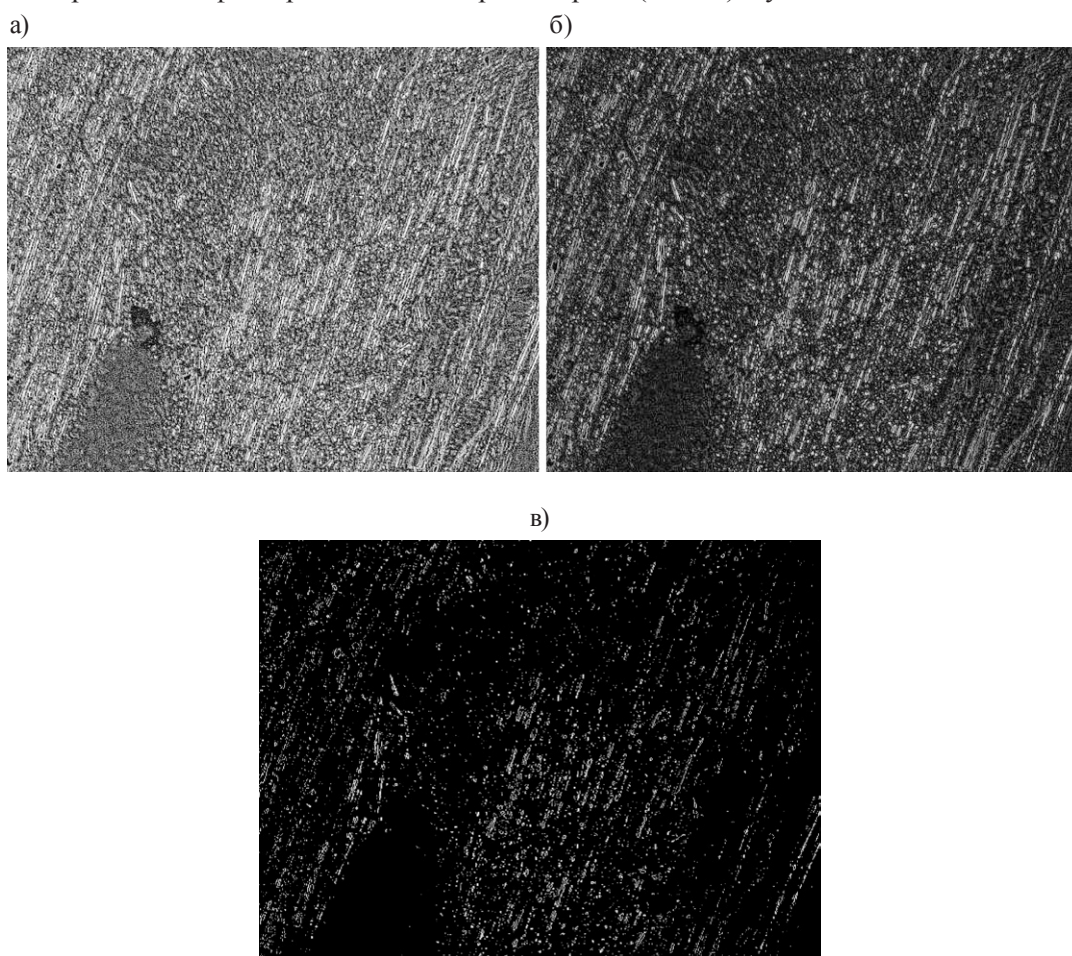


Рис. 5. Использование фильтра Лапласа с разными коэффициентами:
а — коэффициент ядра 25 %; б — коэффициент ядра 50 %; в — коэффициент ядра 75 %

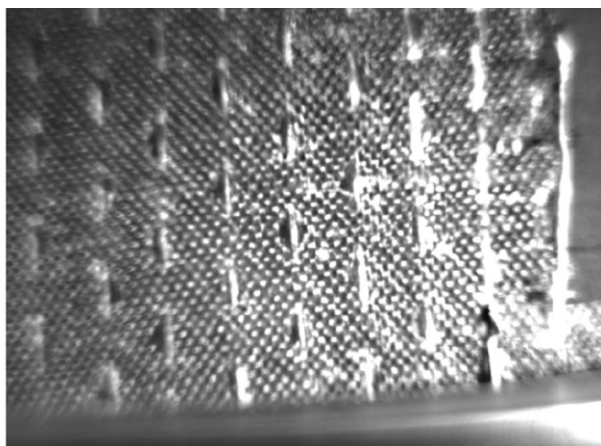
Таблица 2

Применение фильтра Лапласа с ядром свертки для нахождения особых точек на изображении

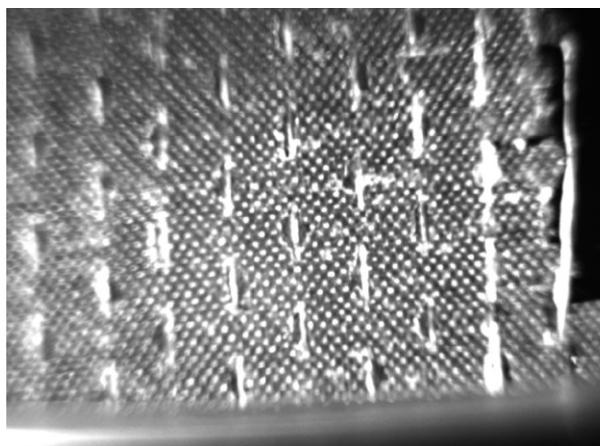
-2	-7	-12	-7	-2
-7	-31	-52	-31	-7
-12	-52	444	-52	-12
-7	-31	-52	-31	-7
-2	-7	-12	-7	-2

Используя дополнительные инструменты обработки изображения и конечную последовательность итераций с фильтром Лапласа, получаем возможность выявить и с учетом калибровки камеры рассчитать параметры крупных дефектов. В зависимости от решаемой задачи, количество изображений одного и того же участка может быть различным. Если требуется детектировать только наличие дефекта (дефектов), то обычно достаточно одного изображения и задача сводится к правильному формированию оптической оси *излучатель — объект — приемник*. Если задача состоит в определении некоторых метрологических характеристик дефектов или составлении диагностической карты поверхности, то потребуется уже несколько изображений, выполненных при различных условиях съемки для реализации стандартного метода фотограмметрии с целью определения пространственных параметров дефекта.

а)



б)



в)

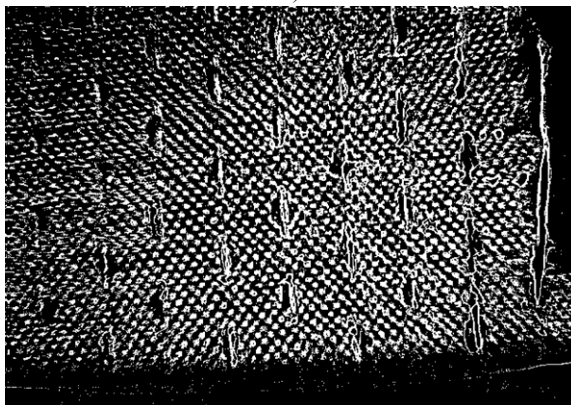


Рис. 6. Результат обработки двух освещенных под разными углами изображений задника одного образца судового воздухопровода, выполненного полимерного композиционного материала (плетение «саржа» ткани УТ -900-3к со связующим ВС -2526), для выявления структуры и ее целостности:
а — 20 % мощности кольцевого осветителя; б — 50 % мощности кольцевого осветителя;
в — 100 % мощности кольцевого осветителя

На текущем этапе были использованы изображения одного и того же участка поверхности воздухопровода из полимерного композиционного материала, который освещался под разными углами относительно неподвижной камеры. Как видно из рис. 6, освещение оказывает существенное влияние на формирование изображения. Однако, применив фильтры Лапласа с предложенными значениями в табл. 2 ядра свертки и выполнив наложение изображений с усреднением результата, получили четкую картину структуры матрицы. Если взять за основу эталонный образец, то полученное изображение можно сохранить в качестве эталонной текстуры, которую следует накладывать на изображения тестируемых образцов и определять их соответствие установленным требованиям.

Выводы

1. Выполненные исследования показывают, что в настоящее время использование систем технического зрения для контроля судовых воздухопроводов, выполненных из композиционных материалов как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации, является наиболее перспективным методом, обеспечивающим достаточную степень достоверности результатов.

2. Выбор фильтра для полученных цифровых изображений может осуществляться визуаль-но на основе выполненного конкретного исследования образца поверхности полимерного компо-зиционного материала и сравнительного анализа фотографий.

3. Все разработанные методики для оценки эксплуатационных показателей качества (ми-крогеометрии, шероховатости, волнистости) поверхностей деталей судовой вентиляции могут ис-пользоваться для крупноразмерных изделий, где уровень контроля сводится к определению соот-ветствия или несоответствия исследуемого образца эталону.

Список литературы

1. *Васильев К. А.* Повышения эффективности работы системы местной вентиляции при механической обработке композиционных полимерных материалов применяемых в современном судостроении / К. А. Ва-сильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макаро-ва. — 2014. — № 5 (27). — С. 64–74.
2. *Безпальчук С. Н.* Использование полимерных композиционных материалов в технологии изго-товления трубопроводов системы судовой вентиляции / С. Н. Безпальчук, К. А. Васильев, А. К. Наумова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 60–65.
3. ГОСТ 24389-89. Системы кондиционирования воздуха, вентиляции и отопления судов. Расчетные параметры воздуха и расчетная температура забортной воды. — Введ. 01.07.1990.
4. Суда внутреннего и смешанного (река–море) плавания. Санитарные правила и нормы Сан. Пин.2.5.2-703-98. — Минздрав России, 1998. — 144 с.
5. *Ветошкин А. Г.* Процессы и аппараты пылеочистки / А. Г. Ветошкин. — Пенза: Пензенский гос. ун-т, 2005. — 210 с.
6. ГОСТ 12.1.016–79. ССБТ. Воздух рабочей зоны. Требования к методикам измерений концентраций вредных веществ. — Введ. 01.01.1982.
7. *Воскресенский В. Е.* Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообраба-тывающих предприятиях. Теория и практика: В 2 т. — Т. 1. Аспирационные и транспортные пневмосисте-мы / В. Е. Воскресенский. — СПб.: Политехника, 2008. — 480 с.
8. *Глебов И. Т.* Аспирационные и транспортные пневмосистемы деревообрабатывающих предпри-ятий / И. Т. Глебов, В. Е. Рысев. — Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2004. — 180 с.
9. *Петров В. М.* Оценка шероховатости точеной поверхности деталей выполненных из композици-онных углепластиков / В. М. Петров // Международная науч.-практ. конф. «Качество поверхностного слоя деталей машин», 24 – 26 июня, 2003. — СПб., 2003. — С. 138–143.

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.1

А. А. Кузнецов,
д-р техн. наук, проф.;

А. В. Галин,
канд. техн. наук, проф.

ГЕНЕЗИС МОДЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ПОРТОВ В СОВРЕМЕННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ НАУКЕ

THE GENESIS OF PORT DEVELOPMENT MODELS IN MODERN TRANSPORTATION SCIENCE

В работе рассматриваются существующие модели развития портов и терминалов, движущие силы и ограничения, определяющие этот процесс. Выделены основные действующие факторы, изучены их индивидуальное и совместное влияние на порт как единую систему. Выявлены причины интереса транспортного сообщества к моделированию развития портов. В работе представлено пять основных моделей портового развития. Отмечено, что каждая из этих моделей служит источником формирования целого кластера модификаций и вариантов, развивающихся базовые в том или ином аспекте. Указанные модели выстроены в историческом порядке возникновения. Это дает возможность ввести в научную практику этапы развития научного подхода к вопросу создания моделей портового развития. Исследованы факторы и силы, привлекаемые к рассмотрению в каждой из моделей, описано их влияние на портовое развитие. Выявлены преимущества каждой из моделей, проведен подробный анализ недостатков. Сформулирована причина отсутствия универсальной модели. Намечены задачи дальнейшего исследования.

The models for ports and terminals development are treated, as well as main driving forces and constraints affecting these processes. Major factors are identified and their individual and joint impact on the port view as a holistic system. The reasons of interest to the ports models development are explained. Five main port development models are included in this paper. It is stressed that every model of this set served as a source for various modifications and variants, enhancing the prototypes in a certain aspect. Presented models are studied over historical background that enables to identify important stages in the development of the scientific approach to the problem of port model development. The factors and forces considered in each model are studied, as well as their influence on port development trajectory. The key benefits of each model was Identified, detailed analysis is made of the disadvantages. The reason for the lack of a universal model is formulated. Objectives of further research are outlined.

Ключевые слова: порт, терминал, регионализация, логистика.

Key words: port, terminal, regionalization, logistics.

Введение

На развитие портов и терминалов оказывает влияние множество факторов различной природы. Все они тесно связаны между собой, образуя сложную взаимодействующую систему, или даже целую совокупность систем, называемую в науке «ансамблем взаимодействующих систем». Внутри каждой из таких систем действующие факторы приобретают уже более структурированный причинно-следственный характер, представляясь последовательно развертывающимися во времени взаимодействующими процессами. Традиционно понимаемое развитие портов, представляя собой один из таких «выделенных» потоков событий, в полной мере относится к такой категории взаимодействующих систем. Оно отражает всю сложную картину причинно-следственных зависимостей, порождаемых развитием технологии транспортировки и обработки грузов, состоянием мировой финансово-экономической системы, уровнем развития средств связи и информационных технологий, состоянием мировой торговли и политической обстановкой, глобальной и региональной [1].

Как следствие, любое развитие конкретного порта в большей или меньшей степени определяется динамикой всех указанных подсистем, а иногда в значительной мере само становится определяющим фактором развития последних. Игнорирование тех или иных аспектов, связей и факторов, определяющих перспективность возможных направлений развития, может стать фатальной ошибкой для судьбы порта. Таким образом, например, закончили свой многовековой успешный путь и пополнили коллекцию музейных объектов порты Лондона и Ливерпуля, чьи позиции на мировой сцене столетиями казались абсолютно незыблемыми. Напротив, понимание этих факторов и их обдуманное использование при планировании и выборе функционального профиля, позволяют превратить рыбацкие деревушки, дотоле даже не отмеченные на картах, в крупнейшие грузовые центры планеты: Феликстоу, Тильбери, Сингапур.

Многочисленные и объективно востребованные, но схоластические и нерезультативные попытки выстроить все возможные варианты развития (реализованные и потенциально возможные) в некоторые понятные и потому предсказуемые пространственно-временные шаблоны продемонстрировали свою несостоятельность. Если бы теория развития портов была чисто исторической наукой и имела целью объяснить, как и почему тот или иной порт достиг своего состояния развития, проблем бы не возникало [2]. К сожалению, от этой теории практика требовала не объяснения причин создавшейся ситуации и их влияния на характеристики того или иного порта, а следующего, весьма нетривиального шага: формулирования рекомендаций по оптимальным направлениям развития и ограничениям его возможностей.

Как следствие, на рубеже XX – XXI вв. у всего мирового транспортного сообщества постепенно стала проявляться потребность в разработке методических основ прогнозирования развития портов. Исследования развития портов проводились и в СССР, а потом и в Российской Федерации [3].

Модели развития портов

Порты рождаются, живут и умирают как живые организмы. Наблюдение за их жизненными циклами постепенно стало выявлять некоторые общие черты и закономерности. Первая, широко известная модель развития портов была предложена английским ученым Джеймсом Бердом в 1980 г., описывающая как портовые инфраструктуры развиваются во времени и пространстве.

Первоначально в своей концепции Берд отразил шесть этапов развития порта.

Возникновение порта: этот этап включает в себя становление порта с небольшой и неглубокой причальной линией, прилегающей к центру города.

Расширение причалов: достижение границ возможного расширения порта внутри центра города, без строительства новых грузовых причалов.

Предельная разработка причального фронта: этап исчерпания технических возможностей обработки судов на первоначальных причалах, связанных с развитием перегрузочной техники и размера судов.

Расширение причальной линии: этап расширения порта и создания новых, более глубоководных и протяженных причалов, способных принимать суда больших размеров и в большем количестве, в большинстве случаев связанный со смещением к устью реки и вдоль морского побережья.

Модернизация причальной линии: этап модернизации погрузо-разгрузочного оборудования с целью ускорения обработки судов больших размеров и вместимости.

Специализация причалов: этап ориентации портовых причалов и портового перегрузочного оборудования на обработку определенных типов принимаемых судов и обрабатываемых грузов.

Автор отметил две основные стратегии развития портов:

– *пространственное развитие*, проявляющееся как движение от центра города путем создания новых глубоководных многоцелевых причалов на свободном пространстве. В то же время происходит постепенная передача городу первоначальных портовых площадок, обычно расположенных на прилегающих к центру площадях, для конверсионного использования (приморские парки, жилье, коммерческое развитие);

– специализация перегрузочного оборудования, или создание перегрузочных комплексов или портов, позволяющих ускорить обработку специализированных судов и уменьшить расходы на переработку грузов.

При этом Берд отмечал, что развитие порта происходит постепенно, т. е. разные части порта могут находиться на разных уровнях развития. Это означает, что теоритически неоптимальное оборудование может использоваться в одних частях порта одновременно с использованием более современного в других частях [4].

Несмотря на первоначально показанную результативность, модель Берда обнаружила недостаточную универсальность, которую пытались скорректировать введением еще нескольких фаз: закрытия, расширения, добавления, консолидации, перепрофилирования и пр. Эти «заплатки» позволяли лучше объяснять процесс развития конкретного порта, но вели к утрате универсальности модели. Ряд авторов считают, что шесть ступеней могут быть сгруппированы в три основные фазы: становление, расширение и специализация. Первым с таким предложением выступил канадский ученый Жан-Поль Родригэ (рис. 1).



Рис. 1. Три стадии развития порта по Дж. Берду и Ж.-П. Родригэ

В то же время сам Берд подчеркивал, что его модель разрабатывалась на основе этапов развития определенных портов и не должна была соответствовать всем портам. Он признал, что модели развития портов могут основываться на различных факторах. Его модель, хотя и названная «Anuport», основывалась на развитии портовых сооружений для соответствия растущим потребностям морского флота, не учитывая такие факторы, как взаимоотношение «город — порт», развитие доступности хинтерленда, специализации портов [5].

Конференция ООН по торговле и развитию (UNCTAD) в 1985 г. предложила свою концепцию развития портов, обобщив полученные Бердом и его последователями результаты и делая основной упор на грузоведческие аспекты портовых операций. Концепция основывалась на том, что движущей силой развития портов является рост объемов и изменение структуры грузопотоков (рис. 2). В соответствии с этой концепцией, предлагалось выделять в развитии портов пять этапов [6].

Конвенциональный (традиционный) порт. На этом этапе развития порт представляет собой группу причалов общего назначения, способных переваливать генеральный груз, т. е. штучные и

навалочные грузы в упакованном виде (например, пшеница в мешках, нефть в бочках, удобрения в пакетах) или с упаковкой в трюме.

Появление навалочного груза. По достижении размеров партий навалочного груза определенного порога и с развитием судостроения экономически целесообразной становится перевозка данного груза навалочным способом на специализированных судах-балкерах. Из общей массы тарно-штучных грузов выделяется частный грузопоток нового вида — навалочный груз, для обработки которого порт должен предоставить отдельный причал со специализированным подъемно-перегрузочным оборудованием. Таким образом, объективно необходимым становится появление терминала навалочных грузов. Параллельно на этом этапе проводится модернизация оборудования для перегрузки генерального груза и расширение причальной линии — как следствие постоянного роста грузопотоков и размеров судов.

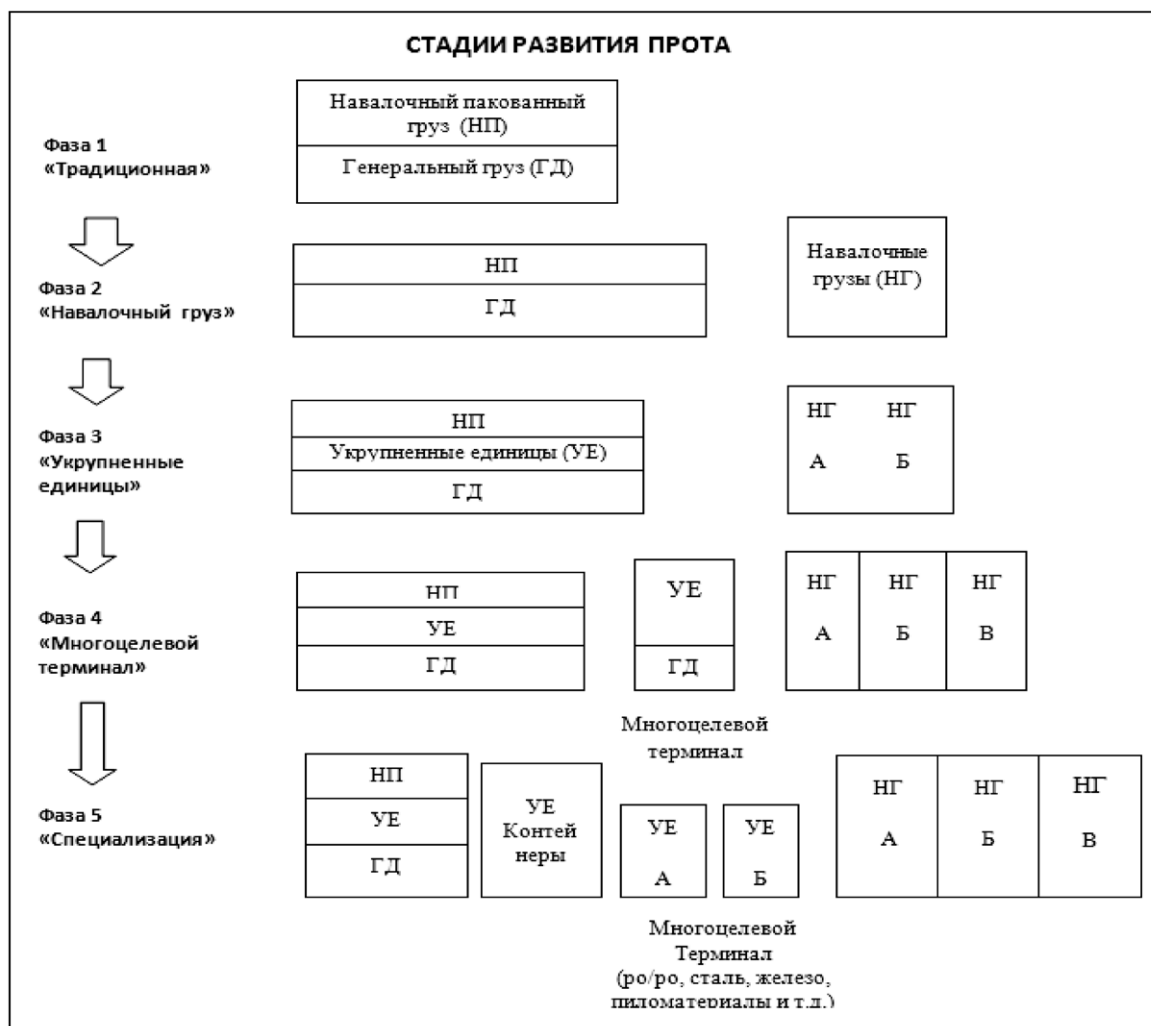


Рис. 2. Этапы развития портов в соответствии с концепцией UNCTAD

Появление укрупненных грузовых единиц (УГЕ). Данный этап характеризуется двумя основными тенденциями. Первая — это появление средств укрупнения тарно-штучных грузов: паллеты, биг-бэги, ящики, крейты, контейнеры, пакеты (металл, пиломатериалы, трубы и пр.). Вначале они представляют небольшую долю грузопотока, обработка данного вида груза происходит на причалах генеральных грузов, а перевозка — на конвенциональных судах. Вторая тенденция состоит в постоянном снижении объема генерального груза за счет выделения из него новых объемов навалочных грузов. Одновременно объемы навалочных грузов достигают значения, при котором для разных видов навалочных грузов требуются разные терминалы.

Транзитивный многоцелевой терминал. Рост использования УГЕ и появление специализированных судов для их перевозки (лесовозы, автомобилевозы, ро-ро суда, контейнеровозы ячеистого типа и др.) требуют специального перегрузочного оборудования для обслуживания. В то же время, грузопотоки каждого вида УГЕ невелики, а приоритет определенной УГЕ в будущем грузопотоке неясен, что обуславливает потребность в гибком многоцелевом терминале, который заменяет часть старых причалов для генеральных грузов.

Этот терминал с более-менее приемлемым качеством справляется со всеми категориями груза и легко может быть превращен в специализированный терминал для того груза, который окажется приоритетным в ближайшем будущем. Параллельно на этом этапе продолжается рост и диверсификация грузопотока сухих навалочных грузов.

Специализация терминалов. Конечным этапом развития любого грузопотока является достижение им такого объема, когда целесообразным является использование специализированного флота для его перевозки морем и специализированных терминалов для его обработки в порту. В этом случае многоцелевые терминалы легко конвертируются в специализированные для переработки данного груза путем закупки дополнительного и незначительно модифицированного оборудования. Ко времени достижения пятого этапа развития остаточный объем генерального груза значительно сокращается, а обработка основных альтернативных грузов (лес, чугун, сталь) группируется на многоцелевых терминалах.

Данная модель объясняет историческую связь изменения природы грузопотока и стратегии развития портов, но она имеет ограниченную применимость в современных условиях сложившихся грузопотоков. В модель заложен только один фактор, хотя и сильно влияющий на развитие порта в долгосрочной перспективе возможных экономических изменений. Влияние других значимых факторов в данной модели не учитывается.

Увеличение коммерческой составляющей, усилия по расширению портовой территории, появление концепции порта как «центра оказания услуг» — все это потребовало нового осмысления того, как и почему должны развиваться порты. К концу XX в. UNCTAD, обратив внимание на радикальное изменение роли портов в мире, инициировала новый этап исследований по выбору модели развития. В результате была предложена концептуальная модель, включающая три обобщенных фазы, или «поколения» развития портов (табл. 1).

Таблица 1

Модель развития порта по UNCTAD

Период развития	Первое поколение	Второе поколение	Третье поколение
	До 1960-х гг.	После 1960-х гг.	После 1980-х гг.
Основной груз	Генеральный груз	Генеральный груз Навалочные/наливные грузы	Навалочный груз Укрупненные грузовые единицы Контейнерный груз
Отношение к развитию порта и его стратегия	<i>Консервативная</i> Порт как точка стыковки видов транспорта	<i>Экспансионистская</i> Транспортный, промышленный и коммерческий центр	<i>Коммерчески ориентированная</i> Интегрированный транспортный центр / логистическая платформа для международной торговли
Сферы деятельности	Погрузочно-разгрузочные работы, хранение, навигационное обслуживание. Причалы и зоны морских грузовых фронтов	То же, плюс преобразование грузов; коммерческий и судороrientированный сервис. Расширение портовой зоны	То же, плюс грузовая и информационная дистрибуция, логистическая деятельность. Терминалы и система наземного распределения

Таблица 1
(Окончание)

Характеристики организации	Независимые виды деятельности внутри порта. Неформальные отношения между портом и клиентами	Тесные отношения между портом и клиентами. Слабая координация видов деятельности в порту. Спорадические отношения между портом и городскими властями	Единое портовое сообщество. Интеграция порта в торговую и транспортную цепь. Тесное сотрудничество с городскими властями. Развитие организационной структуры
Производственные характеристики	Грузопоток. Простые индивидуальные услуги. Низкая добавленная стоимость	Грузопоток. Преобразование грузов. Комплексные услуги. Значительная добавленная стоимость	Грузовой/информационный поток. Грузовая/информационная дистрибуция. Расширенные пакеты услуг. Высокая добавленная стоимость
Решающие факторы	Труд/Капитал	Капитал	Технологии / Ноу-хау

Принцип деления был основан на совокупности ключевых факторов: политики развития порта, ее стратегии, сфере и границах расширения портовой зоны, степени интеграции портовых функций и организационной структуры порта. В то же время, концепция отставляла за рамками ряд важных факторов, например — масштабность порта, его геополитическое положение, соотношение государственных и частных форм владения. Развитие изучалось в некотором дискретном, «модульном» времени, а переход от поколения к поколению связывался с ростом порта, частично определяемым мотивацией лиц, принимающих решения [7].

Порты *первого поколения* в этой модели исполняют роль интерфейса между морским и сухопутным транспортом. Они не предполагали никакой транспортной или торговой деятельности и были далеки от многих требований клиентов. Такая же отстраненность и отсутствие взаимодействия наблюдалась между портом и городскими властями, на чьей территории он находился. Работающие в порту компании были независимы друг от друга, и никогда не думали о совместном продвижении порта на коммерческом уровне.

Порты *второго поколения* отличаются уже некоторым расширенным спектром функций, позволяющим рассматривать их как центр транспортных, промышленных и коммерческих услуг. Все эти новые функции могут характеризоваться как предпринимательская деятельность, добавляющая стоимость грузу. При этом порт становится более открытым для сотрудничества с транспортной отраслью и грузовыми принципалами, равно как и для сотрудничества с соответствующими муниципальными властями. Порты второго поколения перестают быть изолированными от всей остальной транспортной индустрии узлами.

Порты *третьего поколения* являются продуктом глобализации и интеграции. Они рассматриваются как динамичные узлы международной системы производства и распределения, что заставило владельцев перейти к проактивному подходу, превращающему порты в интегрированные транспортные центры и логистические платформы для ведения международной торговли. Функции портов более специализированы, разнообразны и интегрированы, они включают в себя все функции портов первого и второго поколения. На этом этапе стала проявляться важность использования современного портового оборудования и развитых информационных технологий.

Промышленные услуги в этой модели предлагалось делить на судо-ориентированные и грузо-ориентированные. Для развития последних были созданы промышленные зоны, целью которых было привлечение грузопотока. В это же время начали разрабатываться меры по защите окружающей среды, направленные на снижение вредных последствий портовой деятельности.

В портах третьего поколения резко возросла административная эффективность благодаря совершенствованию документооборота и за счет появления ранних предшественников современных информационных технологий. Повысилось качество сменно-суточного планирования работы портов, обеспечивающего лучшее использование портовой инфраструктуры. Административные и расширенные коммерческие услуги портов третьего поколения вышли на качественно новый уровень.

В портовые операции были инкорпорированы возможности логистических и товарораспределительных систем, избавив порты от их традиционной функции долгосрочного и среднесрочного складирования грузов. Контейнеризация превратила порт в «проходной коридор», в котором грузы более не задерживались, тем самым снижая возможность создания добавленной стоимости.

Описываемая модель была полезным инструментом анализа и сравнения, что делало ее популярной и признанной в течение нескольких десятилетий. В то же время, упрощенный «черно-белый» взгляд на развитие порта, присущий этой модели, быстро делал ее все менее реалистичной и точной, не отражающей события бурно развивающегося мира портовой индустрии. Специалистами-практиками было отмечено, что развитие портов не реализовывалось отдельными «дискретными» стадиями, и не все порты проходили одни и те же циклы для перехода в третье поколение. Более того, отдельные терминалы порта демонстрировали дифференцированное развитие, отвечая на специфические запросы. Коммерческое давление и цели являлись основным фактором, определяющим это развитие, а внедрение нового оборудования и технологий являлось непрерывным процессом. Как следствие, даже самые передовые с точки зрения системности, оборудования или проектов терминалов порты часто сохраняли рудименты ранних стадий развития, которые вносили свой вклад в общую эффективность.

Кроме того, судостроение и организация судоходства демонстрировали изменения, которые не предполагались при создании модели в 1980-х гг. Возникла и значительная сложность объективного отнесения порта к тому или иному поколению: эта процедура была достаточно субъективной, а значит связанной с риском ошибок, поскольку каждый порт в большей или меньшей степени является уникальным.

Большинство важных процессов, описываемых с точки зрения последовательных поколений портов моделью UNCTAD, были неоднозначными и неточными. Развитие не фиксируется в определенный момент времени и не обязательно проходит весь цикл, чтобы получить статус порта третьего поколения. Модель выделения дискретных «портовых поколений», таким образом, не может точно отражать портовую отрасль в глобальном масштабе. При внимательном изучении становилось ясным, что указанная модель не отражает ситуацию, которая превалировала в последние четыре десятилетия. Широкий круг других факторов, таких как размер порта, географическое положение, трудовая культура, степень общественной/личной вовлеченности продемонстрировали серьезные изменения. Все это следовало учесть для лучшего описания существующей в портах ситуации, которая не могла быть реалистично разделена по категориям в «поколениях».

Фундаментальные проблемы, связанные с моделью «поколений портов», уже не позволяли включить в нее все изменения, которые произошли в портовом бизнесе за четыре десятилетия. Характеристики развития портов следовало обобщать не в форме их фиксации в той или иной временной стадии. Модель должна была отражать изменения во времени, в то же время, рассматривая важные категории свойств по отдельности. В этом смысле потребовалось включить в круг рассмотрения намного больше свойств и характеристик, чем предполагалось в ранних моделях. Культура ведения портового бизнеса, вопросы охраны труда, экологии, социальные проблемы и прочее стали привлекать внимание все больше и больше.

Все сказанное привело к появлению новой концепции модели развития портов, получившей названия WORKPORT. Основные черты этой модели показаны в табл. 2.

В этой таблице расширяющимися и сужающимися стрелами показаны основные тенденции, наблюдаемые в процессе развития портов, которые служат ключом к поиску путей повышения эффективности и возможностей роста для портовых властей и работающих в порту компаний.

Было выделено восемь факторов, характеризующих развитие портов, плюс фактор, характеризующий основное отличие каждого периода развития порта. К восьми факторам относятся: форма собственности, виды грузов, организация и процессы погрузо-разгрузочных работ, информационное обеспечение и поддерживающие системы, трудовая культура, развитие и портовые функции, безопасность труда и здравоохранение, охрана окружающей среды [8]. Далее эти функции рассмотрены более детально.

В 1960-х гг. порты были в основном точками обмена грузами между морским и наземным транспортом. В связи этим они были сфокусированы на грузе, но только в части, касающейся перемещения грузов с одного вида транспорта на другой. В 1970-х гг. портовые функции и процессы постепенно развивались в совокупности со свободными торговыми зонами, возникшими в 1970-х гг., и в контексте тесных и более комплексных отношений, которые начинали складываться между портами и портовыми пользователями. В 1980-х гг. часть портов диверсифицировалась в развивающуюся область логистики и начала предлагать сервис добавочной стоимости. Происходила интеграция в транспортные цепи в разной степени, в зависимости от груза и требований клиентов. 1990-е гг. показали развитие глобализационного процесса в портовой индустрии в виде слияний, приобретений и совместных операций, которые становились все более обычными и комплексными. Авторы модели подчеркивают, что все изменения в развитии портовых функций происходили эволюционно, а не дискретным/революционным путем, как подразумевается в модели «поколений портов».

Модель WORKPORT в значительной мере расширила круг вовлекаемых в анализ факторов и характеристик, привнесла в рассмотрение новые связи и закономерности, тем самым сделав важный шаг в развитии теоретических представлений. В то же время, она уклонилась в сторону содержательного описания и констатации событий, затрудняя использование ее как инструмента прогноза и обобщенного анализа чувствительности вида «если ..., то ...». Кроме того, данная модель не полностью отражала роль опережающего развития логистического фона и протекающих новых процессов.

Таблица 2

Схематичная модель процессов в портах согласно модели WORKPORT

	1960-е гг.		1970-е гг.	1980-е гг.	1990-е гг.	2000-е гг.
Собственность	Инфраструктура находится в основном в муниципальной собственности (в основном УК). Управление и грузовые операции находятся в общественном или частном секторе собственности в зависимости от страны/порта	Усиление присутствия частной собственности, особенно в части управления и грузовых операций		Приватизация национальных портов (в основном УК) Укрупнение портовой собственности Усиление коммерциализации в управлении портами. Порты становятся более ориентированными на клиентов. Дальнейшая приватизация портов (УК)	Концентрации собственности контейнерных терминалов путем частичного поглощения международными операторскими компаниями	

Таблица 2
(Продолжение)

Виды грузов	Генеральный тарно-штучный груз: – начало изменения технологий ПРР с тарно-штучных грузов на укрупненные грузовые единицы; – генеральный груз разделяется на контейнеризированный, Ро-Ро, палетизированный, нео балк и брейк балк. Навалочный груз: – небольшие изменения по форме Наливной груз: – небольшие изменения по форме			Суда становятся больше, растёт грузоподъёмность/грузовместимость		Консолидация генеральных грузов практически завершена
Организация процесса перегрузки грузов	Генеральный груз		Рост механизации и автоматизации процессов одновременно с началом процесса укрупнения грузовых единиц		Полная автоматизация перегрузочных операций и складирования на некоторых контейнерных терминалах	
	Навалочные грузы	Высокомеханизированный процесс	Специализация терминалов	Полная автоматизация		
	Наливные грузы	Высокомеханизированный и автоматизированный процесс	Специализация терминалов	Увеличение автоматизации		
Поддерживающие процессы и информационное сообщение	Связь, документооборот и обмен информацией. Ручная, основанная на бумажных носителях		Почта, телефон, телеграф, факс	Почта, телефон, факс, телекс, радио, EDI	Почта, телефон, факс, телекс, радио, EDI, интернет	Стандартизация информации
Организация труда: – трудовые ресурсы; – организация работ; – условия труда; – трудовой договор; – трудовые отношения	ПРР по генеральным грузам интенсивно в использовании рабочей силы, в остальных видах ПРР механизация. Много ручного труда. Сильное влияние профсоюзов. Иерархическая организация структуры		Укрупнение грузовых единиц ведёт к механизации труда, заменяющей ручной. Усиление специализации рабочей силы. Уменьшение используемой рабочей силы с увеличением грузопотока.	Совмещение профессий основного персонала. Плоская организационная структура. Возрастание потребностей в IT-знаниях. Круглосуточный цикл работы становится обычным. Начало замены прямых контрактов с рабочими на контракты через пул рабочей силы (агентства)	Большой акцент на аспект качества предоставляемых услуг	Фаза трудовых пулов завершена

Таблица 2
(Окончание)

Портовые функции Процессы развития	Место смены вида транспорта Ориентирован на груз, с некоторой второстепенной деятельностью за пределами основной функции. Неформальные контакты с клиентами порта	Рост индустриализации. Расширение территории порта. Более тесные контакты порта с клиентами	Диверсификация компаний, находящихся в порту, в логистические и компании, предоставляющие дополнительный сервис. Создание свободных портов и дистрибуционных центров. Объединенное управление портом	Процесс глобализации портов	Процесс глобализации портов
Аспекты здравоохранения и безопасности рабочей среды	Опасность портовых работ из-за высокой доли ручного труда и неадекватного регулирования, недостаточная подготовка рабочих	Снижение аварийности и сокращение невыходов на работу из-за проблем со здоровьем. Меньше аварий и проблем с физическим здоровьем из-за сокращения ручных операций (но если несчастные случаи произойдут, они скорее всего, будут катастрофическими)	Лучше эргономичный дизайн грузового оборудования	Улучшение подготовки по технике безопасности. Официальная политика защиты здоровья и безопасности. EU-директивы по рабочему времени. Ужесточение экологического контроля на рабочем месте	
Экология	Как правило, низкий уровень осведомленности	Реагирование на инциденты	EU экологическая оценка Специальное законодательство Повышение осведомленности/ответственности. Местные инициативы	Более активная система экологического менеджмента. Директивы ЕС, ESPO/ECO информация	Соответствие плюс интеграция экологических проблем в бизнес-план. Гарантированное качество EMS
Решающие факторы	Трудоемкость	Капиталоемкие — внедрение новых технологий	Дальнейший прогресс в технологиях	Информационные и коммуникационные технологии	Интеграция интересов всего портового сообщества

В качестве ответа на возникшие общественные потребности в сфере портового и транспортно-логистического бизнеса Ж.-П. Родригэ и Т. Е. Ноттебум в конце XX в. предложили несколько моделей, развивающих эти представления. В них объединялись разные подходы и учитывались урбани-

стические аспекты развития. К модели портового развития Берда авторы добавили фазу «портовой регионализации». Эта позволяло объяснить причины появления и развития портов транshipmenta, формирование логистических полюсов и иных аспектов интеграции в хинтерленд (рис. 3).

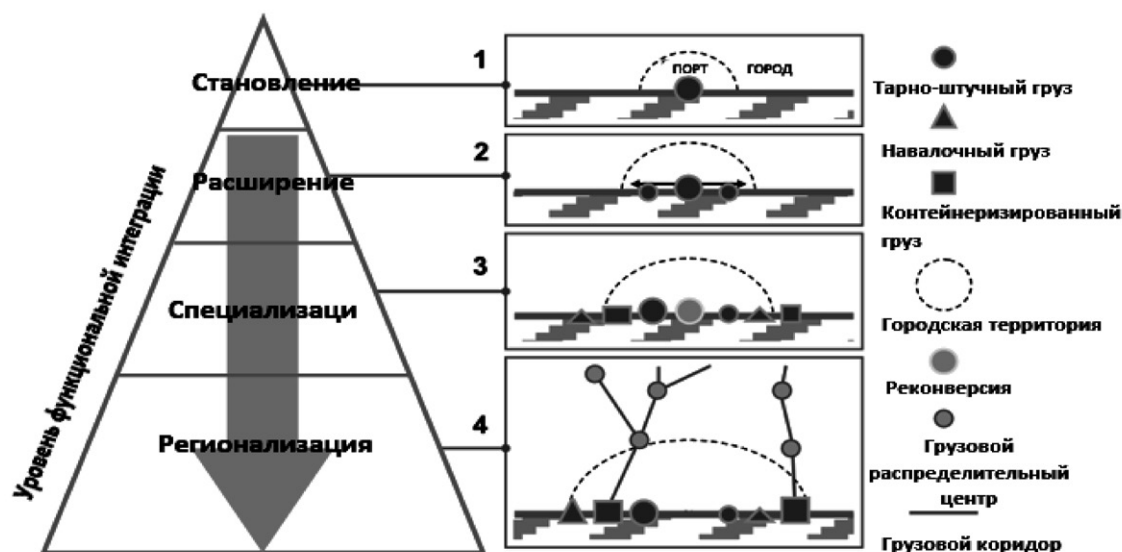


Рис. 3. Модель развития портов по Родригэ и Ноттебуму

Пересмотренная модель развития портовой системы была основана на двух основных положениях. *Первое положение* включает в себя срастание «оффшорных» (ступичных) портов островного расположения и континентальных портов с ограниченным хинтерлендом в единую систему контейнерного грузораспределения, формирующую хинтерленды других континентальных портов, с которыми они связаны фидерными линиями [9].

Второе положение относится к включению внутренних грузовых терминалов как активных центров в формирование и развитие хинтерлендов портов. Фаза портовой регионализации добавляется к модели Берда как следующая стадия развития портов, характеризующаяся сильной функциональной связью (и даже совместным развитием) портов и мультимодальных тыловых логистических платформ, что приводит к формированию региональной сети грузовых центров и расширению хинтерленда портов (рис. 4).

Ключевое отличие модели портовой регионализации заключается в том, что она изучает развитие портов в динамике, рассматривая хабы, тыловые логистические платформы и морские порты как единую систему, формирующую сети грузораспределения. Авторы модели отметили, что переход к фазе портовой регионализации есть постепенный и управляемый рынком процесс, влияющий на порт и отражающий повышенное внимание участников рынка к интеграции логистики. В то же время, концепция не раскрывала детально вопросы, каким образом регионализация влияет на развитие портов, какую роль играет каждый из участников процесса регионализации, какие стратегии портов (терминалов, муниципального руководства порта и городов) должны приниматься, чтобы управлять этим процессом [10].

В своей работе авторы отмечали, что существует два основных направления развития порта: как «полюса» и как «узла». Под развитием порта как «полюса», авторы понимали развитие порта как точки соединения различных транспортных инфраструктур. С точки зрения развития как «узла», авторы понимали порт как определенный центр, формулирующий торговые сети различных масштабов для организации товародвижения в хинтерленде. В предложенной модели, тем не менее, основное внимание было уделено развитию порта как «узла», т. е. по сути, был рассмотрен лишь частный случай развития, характерный для специализированных контейнерных терминалов, вовлеченных в процесс глобализации торговли и цепочек поставок.

Уровень
функциональной
интеграции



порт

город

Тарно-штучный груз

Навалочный груз

Контейнеризованный
груз

Городская территория

Реконверсия

Грузовой
распределительный
центр

Грузовой коридор

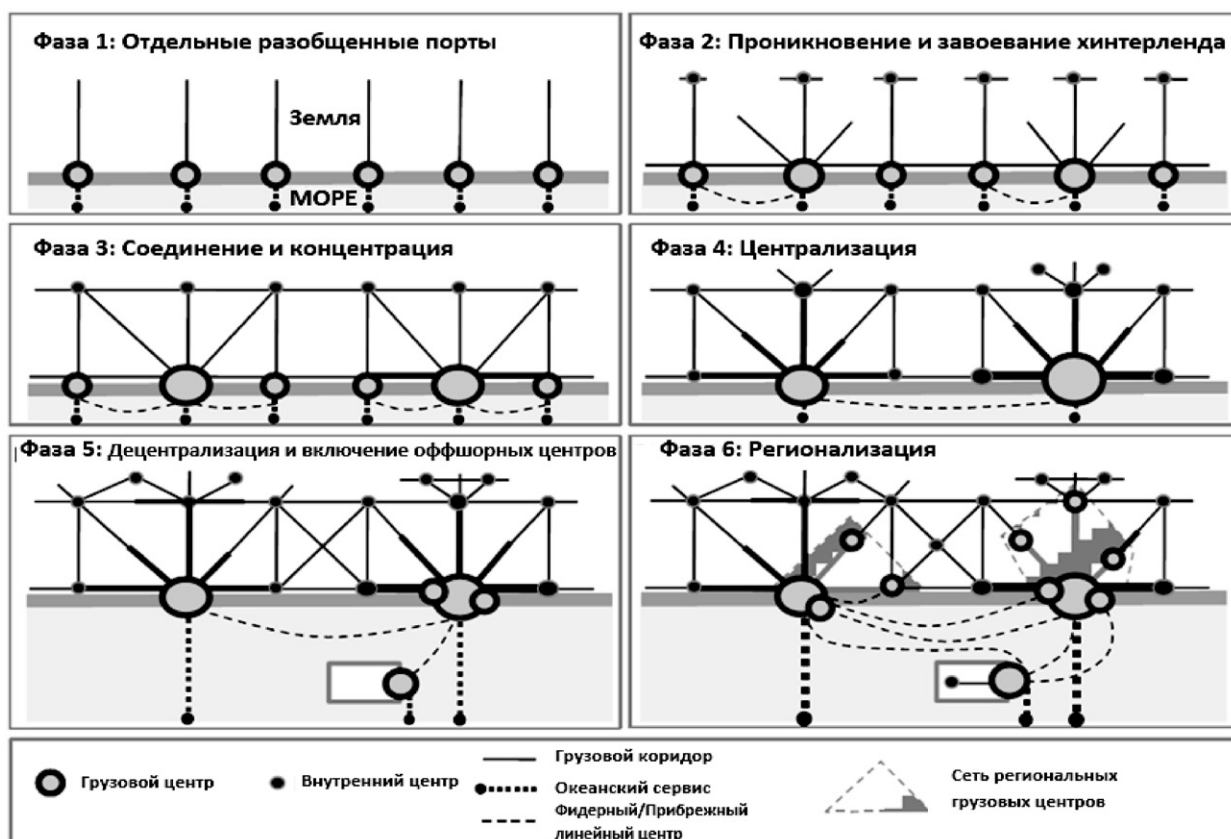


Рис. 4. Развитие модели Родригэ-Ноттебума

Выводы

Рассмотренные основные модели, быстро копируемые последователями и подражателями, со временем становились все изощреннее и мощнее, обретая стройность и самоценность теоретических построений. В то же время, они становились все менее приспособленными для ответа на формируемые практикой вопросы о будущем развитии конкретного порта.

Постепенно становилось все очевиднее, что единой универсальной модели изучаемого объекта (процесса развития порта) создать не удастся, и что гносеологические причины этого лежат не в слабости концептуальных построений, но в самой природе изучаемого явления.

Из рассмотренных моделей можно заключить, что развитие портов происходило под действием различных внешних сил и внутренних ограничений. В процессе развития общества вообще и портового кластера в частности степень воздействия различных факторов и ограничений постоянно меняется, и в разное время на разные порты оказывали ключевое воздействие разные силы.

Задача создания единой модели пока не может считаться решенной, а потому идентификация действующих на развитие портов факторов, оценка влияния ограничений и мотиваций должна продолжаться. Это, возможно, позволит создать современную модель развития портов, универсальную и обладающую гносеологической ценностью.

Список литературы

1. Кузнецов А. Л. Базовая модель логистических потоков через контейнерный терминал / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2 (52). — С. 18–20.
2. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование как инструмент проектирования морских и наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, В. А. Блудкина // Тезисы докладов науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. — С. 237–240.
3. Степанов А. Л. Порт в транспортной логистике / А. Л. Степанов, А. С. Титов, Е. В. Синельщиков [и др.] / под ред. А. Л. Степанова. — СПб.: Лион, 2008. — 228 с.
4. Россо В. Обзор сухогрузных портов / В. Россо, К. Люмсен // Морская логистика. — 2009. — № 12. — С. 196–213.
5. Берсефорд А. Портовое развитие от перегрузки к логистическим центрам / А. Берсефорд, М. Брукс // Морская политика и управление. — 2004. — № 31. — С. 47–68.
6. Портовое развитие // Материалы конференции ООН по развитию и торговле. — Женева: Изд-во ООН, 2008. — 296 с.
7. Развитие стратегии города и порта // Материалы конференции ООН по развитию и торговле. — Женева: Изд-во ООН, 2002. — 324 с.
8. Ниниполус А. Воркпорт / А. Ниниполус. — Афины: Саге Публикейшн, 2007. — 128 с.
9. Родригэ Ж.-П. Портовая регионализация / Ж.-П. Родригэ, Т. Ноттебум // Международное судоходство и портовое исследование. — 2005. — № 32. — С. 231–297.
10. Родригэ Ж.-П. Портовая терминализация цепочек поставок / Ж.-П. Родригэ, Т. Ноттебум // Морская политика и управление. — 2009. — № 36. — С. 165–183.

НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ К СУЩНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ НАЛОГОВЫМИ РИСКАМИ В СУДОХОДНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

A SCIENTIFIC APPROACH TO TAX RISK MANAGEMENT IN SHIPPING

В статье выполнен ретроспективный анализ развития понятия «риск», систематизированы научные точки зрения относительно категории «налоговый риск» и его позиционирования, как разновидность экономического риска в системе внутрифирменного риск-менеджмента. Выделены позиции государства через действие налоговых органов и организаций-налогоплательщиков. Детально рассмотрена сущность налоговых рисков на локальном уровне внутрифирменного управления. На основе выполненных исследований предложено авторское определение управления налоговыми рисками в судоходных компаниях с учетом специфики их деятельности. Это может быть использовано в качестве методической основы при принятии эффективных управленческих решений по регулированию внутрифирменного налогообложения судоходного бизнеса с целью предотвращения негативных последствий, таких как: снижения конкурентоспособности, сокращения или ликвидации деятельности; снижения финансово-экономических результатов, ресурсов и имущественного комплекса; роста текучести персонала.

The article gives a retrospective analysis of the concept of «risk», and systematizes scientific approaches to the category of «tax risk» and its positioning in corporate risk management as a type of economic risk. The article highlights the interaction between government and business, reflected by the actions of the tax authorities and taxpayers. The essence of tax risk is examined at the local level of corporate management. The author has proposed the concept of tax risk management for shipping companies consistent with their activities, based upon the research conducted. It can be used as a methodological basis for effective managerial decisions on regulation of taxation in shipping companies in order to prevent negative consequences, such as the loss of competitiveness, reduction or elimination of activities; financial losses, increased staff turnover.

Ключевые слова: риск, экономический риск, налоговый риск, потери, последствия, управленческие решения, внутрифирменный финансово-экономический риск-менеджмент.

Key words: risk, economic risk, tax risk, losses, consequences, administrative decisions, corporate financial and economic risk management.



ПОНЯТИЕ «налоговые риски» неразрывно связано с сущностью риска в целом и экономическими рисками в определенном виде деятельности, в частности — в судоходном бизнесе.

Термин «риск» прошел сложный путь развития, и его сущность целесообразно рассматривать с исторических и экономических позиций. Как историческая категория, он представляет собой осознанную человеком возможную опасность и во все времена связан с ходом общественного развития. Авторами с применением ретроспективного метода рассмотрено эволюционное развитие этого понятия и на основе методов группировки и обобщения выполнена систематизация научных точек зрения относительно понятийной сущности налоговых рисков и их позиционирования в системе экономических рисков. Анализировались работы ведущих ученых в области риск-менеджмента и налогообложения.

В первоначальной трактовке, упоминаемой еще Гомером, риск характеризовался как «опасность лавирования между скал», что отразилось в греческом варианте *ridsikon*, латинском — *ridsicare*, французском — *risdoe*.

В русском языке «рисковать» — значит пускаться наудачу, на неверное дело, действовать смело, предприимчиво, надеясь на счастье. В. И. Даль определял риск как предприимчивость, желание делать что-то без верного расчета [1], а С. И. Ожегов — как возможную опасность, действие наудачу в надежде на счастливый исход [2].

Обобщая эти определения, можно сказать, что риск — это опасность, угрожающая успешному результату. Кроме того, исследуемое понятие отражает возможные потери, вытекающие из специфики тех или иных явлений природы и видов деятельности человеческого общества.

Важно, что риск можно обозначить как измеренную неопределенность. Как отмечает Ю. А. Дятлов, феномен риска — это форма проявления человеческой субъективности в объективно обусловленных социальных ситуациях, фундаментальным признаком которых является ограниченность имеющихся ресурсов, что создает обстановку неопределенности и требует от социального субъекта выбора своего поведения в виде ответа на угрозы и вызовы. С другой стороны, в эпоху постмодерна отдельными авторами высказывается противоположное мнение: «Риск есть порождение эпохи рационализации социальной деятельности, когда исчезает представление о предопределенности всего происходящего с человеком, возрастает возможность предсказать последствия его решения и существует определенная возможность предсказать последствия его решений» [3].

По мере развития цивилизации, с появлением товарно-денежных отношений *риск становится экономической категорией* и является событием, которое может произойти в трех основных вариантах: отрицательном (проигрыш, ущерб, убыток), нулевом и положительном (выигрыш, выгода, прибыль).

Для достижения наилучшего экономического результата событиями необходимо управлять, т. е. использовать различные инструменты, позволяющие в определенной степени прогнозировать наступление рискованного случая и принимать меры к снижению риска. Эффективность принятия управленческих решений во многом определяется классификацией, т. е. разделением риска на конкретные группы по определенным признакам для достижения поставленных целей.

Особая группа рисков выделяется по критерию ущерба, который может быть измерен в денежном эквиваленте. Эта группа получила название «экономические риски», которые в настоящее время наиболее активно исследуются как составляющая любого вида деятельности.

В научной литературе выделяются две основные теории экономического риска — классическая и неоклассическая. Дж. Милль и Н. У. Сениор, представители классической теории, сравнивают его с ожиданием потерь, которые могут произойти в результате принятого решения. Такой подход не учитывает множество факторов и получил дальнейшее развитие в неоклассической теории. Ее представители (Ф. Найт, А. Маршалл и А. Пигу) определяют риск как вероятность отклонения от поставленных целей, отмечая, что предприниматель трудится в условиях неопределенности, руководствуется размерами ожидаемой прибыли и величиной ее возможных колебаний. Действия бизнеса обусловлены концепцией предельной пользы, т. е. при одинаковом размере потенциальной прибыли выбирается вариант, связанный с меньшим уровнем риска. Дж. Кейнс обратил внимание на «склонность к риску», когда возможно пойти на больший риск, если ожидаемая прибыль будет большей.

Проблеме информационного обеспечения программы по управлению риском на предприятии посвящена работа Г. В. Черновой, где экономический риск рассматривается как возможность случайного возникновения нежелательных убытков, измеряемых в денежном выражении, так же считает и А. Е. Шевелев [4]. В таком подходе существенны следующие моменты: возможность, неопределенность, непредсказуемость, случайность возникновения убытка; нежелательность его возникновения, денежное измерение убытка, которое позволяет количественно оценить возможные риски и убытки (в естественной для бизнеса форме), а также управление ими при помощи различных экономических инструментов и методов, позволяющих работать с денежными суммами. Г. В. Чернова подчеркивает, что экономические риски не охватывают лишь те риски, возникновение которых приводит к денежному ущербу. Они включают также риски, приводящие к ущербу

неэкономической природы, которые прямо или косвенно можно оценить в денежной форме. Так, риск заболеваемости, являющийся риском неэкономическим, связан с физиологическим ущербом, который не полностью соответствует прямому и косвенному экономическому ущербу, измеряемому как стоимость лечения, потери работодателя и т. п. [5].

В определении В. Н. Уродовских, экономический риск возникает из-за опасности потерь в процессе финансово-хозяйственной деятельности, связанной с неопределенностью результатов коммерческой сделки, и по структурному признаку делится на следующие риски: имущественные — вызваны возможностью потери имущества гражданина или предпринимателя по причине кражи, диверсии, халатности, перенапряжениями технической и технологической систем и т. п.; производственные — связаны с убытками из-за остановки производства вследствие гибели или повреждения основных и оборотных фондов (оборудования, сырья, транспорта и т. п.), а также с убытками, возникающими при внедрении в производство новой техники и технологий; торговые — связаны с возможностью убытков по причине задержки платежей, отказа от платежа в период транспортировки товара, непоставки товара и т. п.; финансовые — это вероятность возникновения убытков или недополучения доходов в сравнении с прогнозируемым вариантом [6].

А. С. Шапкин, считает, что экономическое поведение предпринимателя при рыночных отношениях основано на выбираемой на свой страх и риск реализуемой программе в рамках возможностей, которые вытекают из законодательных актов. Каждый участник рыночных отношений изначально лишен гарантий успеха: обеспеченной доли участия в рынке, доступности к производственным ресурсам по фиксированным ценам, устойчивости покупательной способности денежных единиц, неизменности норм и нормативов и других инструментов экономического управления. Способность рисковать — одно из условий успешной деятельности предпринимателя. В этом проявляется конструктивная форма регулятивной функции предпринимательского риска [7].

По мнению Я. Д. Вишнякова, экономический *«...риск при осуществлении определенной предпринимательской деятельности — это, с одной стороны, мера возможных потерь организацией части ресурсов, возникновения убытков, появления дополнительных расходов и недополучения доходов по сравнению с прогнозируемым вариантом, а с другой — действие, выполняемое в условиях выбора, в надежде на получение прибыли, когда в случае неудачи существует возможность оказаться в худшем положении, чем до выбора. В такой трактовке термин “риск” ближе к термину “шанс”»* [8].

По мнению Л. Н. Тэпмана, *«...экономический риск для предпринимательской фирмы состоит в том, что стоимость ее активов и пассивов в национальной валюте может меняться в большую или меньшую сторону из-за будущих изменений валютного курса. Это также относится к инвесторам, зарубежные инвестиции которых — акции или долговые обязательства — приносят доход в иностранной валюте»* [9].

Д. М. Щекин со ссылкой на В. М. Танаева [10] отмечает, что риск является базовой категорией частного права; риск рассматривается как фундаментальная, стержневая экономическая категория либерального общества, основным условием существования которого является свободный рыночный механизм [10].

Приведенные определения позволяют сделать вывод, что экономический риск возникает при любых видах деятельности, прямо или косвенно выражен в денежном эквиваленте и связан с получением дополнительного экономического эффекта или сохранения достигнутых позиций, а при отрицательном результате — с потерями каких-либо ценностей.

В современных условиях сформулированные результаты рискованных управленческих действий тесно связаны с проводимой внутрифирменной налоговой политикой, что систематизировано А. И. Плотниковой в статье «Анализ научных позиций в определении внутрифирменных налоговых рисков» [11]. В общей системе внутрифирменного риск-менеджмента налоговые риски являются составной частью финансово-экономических рисков, которые очень важны для стабильной работы организации и ее экономического развития. Авторы подчеркивают, что налоговые

риски необходимо рассматривать как с позиции организации, так и с позиции государства в лице налоговых органов.

Анализ литературы, касающийся рисков в налоговой сфере, позволяет сделать вывод, что в основном исследования посвящены налоговым рискам организации как налогоплательщика, которые включают:

- риск сокращения или ликвидации бизнеса вследствие повышения налоговой нагрузки или потери деловой репутации и обусловленного этим отказа контрагентов от деловых связей;
- риск снижения объемов финансовых ресурсов и имущественного потенциала вследствие финансовых потерь в виде дополнительных платежей в бюджет, включая штрафные санкции, арест имущества, ограничение операций по счетам и др.

Налоговые органы рассматривают налоговые риски как:

- риск снижения или невыполнения плана налоговых поступлений в бюджетную систему страны, в том числе — вследствие применения организациями «легальных» схем минимизации налоговых платежей;
- риск системного сужения налоговой базы вследствие сокращения объемов отечественного и иностранного бизнеса и инвестиций;
- риск развития теневого бизнеса;
- риск снижения конкурентоспособности национальной налоговой системы.

В научной экономической литературе этому понятию уделяется достаточно большое значение. Выполненный анализ публикаций позволил систематизировать и выделить четыре укрупненных подхода (табл.).

Подходы к определению понятия «налоговый риск»

№ п/п.	Сущность подходов
1	Налоговый риск — это неточности в законодательстве, приводящие к его непониманию и неверному толкованию. Авторы: И. Т. Балабанов, С. К. Содномова, К. П. Тоцкая, Т. А. Козенкова, Д. М. Щекин, В. Г. Пансков, М. Р. Пинская, С. Cozmei, E. C. Serban
2	Налоговый риск — это неблагоприятные финансовые и иные последствия в результате действий или бездействий участников налоговых правоотношений — организаций и государства. Авторы: А. В. Брызгалин, И. Н. Демчук, И. Я. Лукасевич, Ф. Н. Филина, Д. М. Щекин, А. Г. Иванян, А. Ю. Че, Н. А. Павленко, Н. Пятницкий
3	Налоговые риски — это разновидность экономических рисков, рассматриваемых как возможность возникновения случайных и неслучайных нежелательных убытков измеряемых в денежном выражении. Авторы: Л. И. Гончаренко, А. Зуйков, Л. Г. Липник, М. И. Мигунова, Д. Н. Тихонов, А. Е. Шевелев, Е. В. Шевелева, А. А. Пилипенко, М. Р. Пинская, И. Н. Демчук, И. А. Лисовская, Э. Л. Калашникова, Я. Шишкина, П. Бернар, Ж.-К. Колли, С. А. Филин, А. Е. Богданова
4	Налоговый риск — это риск налоговой, административной, уголовной ответственности для организаций. Авторы: А. В. Боброва, Л. Г. Ильинская

Первый подход, который отражен в работах И. Т. Балабанова, К. П. Тоцкой, С. К. Содномовой, Т. А. Козенковой, Д. М. Щекина, В. Г. Панскова, М. Р. Пинской, С. Cozmei, E. C. Serban характеризует неточности в законодательстве, приводящие к его непониманию, неверному толкованию и разногласиям со стороны организаций и контролирующих органов, что создает финансовую угрозу в виде уплаты пеней и штрафов [12] – [15], [10], [16] – [18].

Важно подчеркнуть, что действующий Налоговый кодекс РФ и иные законодательные акты не раскрывают содержание термина «налоговый риск», однако этот термин широко используется в целом ряде нормативных документов и публикаций специалистов в области налогообложения.

Кроме того, по мнению иностранных бизнесменов, работающих или планирующих работу в России, наиболее существенными рисками при реализации инвестиционных проектов наряду с правовыми и административными являются именно налоговые, т. е. в данном случае риски несправедливого налогообложения, некорректное применение налогового законодательства, необъективные судебные решения по результатам налоговых проверок.

Экономическая наука, моделируя концепцию налогового риска, в первую очередь акцентирует внимание на вероятностном характере негативных последствий для налогоплательщика. В. Г. Пансков устанавливает, что налоговый риск — это вероятность возникновения в процессе налогообложения для субъекта налоговых правоотношений финансовых и других потерь, вызванных изменением, несоблюдением, незнанием налогового законодательства, а также его недостаточной правовой проработкой [16]. М. Р. Пинская также понятийно соотносит налоговые риски с уязвимыми местами, считая, что налоговый риск с точки зрения налогоплательщика — это вероятность (угроза) доначисления ему налогов (сборов), пеней и штрафов в ходе налоговой проверки из-за возникших разногласий между налогоплательщиками и налоговыми органами в трактовке налогового законодательства, которые могут обернуться для хозяйствующего субъекта действительным возрастанием налогового бремени [17].

Следует отметить, что в вероятностной среде любая деятельность оценивается в понятиях риска, т. е. поддается своего рода общей оценке степени ее рискованности с точки зрения возможных результатов.

К. П. Тоцкая уточняет, что «...налоговый риск — это вероятность возникновения финансовых потерь, связанных с неопределенностью процессов исчисления и уплаты налогов и вызванных неоднозначностью и неточностью налогового законодательства» [13].

По мнению С. К. Содномовой, «...налоговый риск налогоплательщика — это вероятность такой ситуации, когда налогоплательщик может понести убытки в результате неправильного понимания воли законодателя» [14]. Аналогичную позицию высказывает и Т. А. Козенкова, которая проявление налоговых рисков связывает с изменениями в налоговой политике налоговых ставок и льгот, введением новых налогов, таким образом, рассматривая только законодательные налоговые риски [15].

Д. М. Щекин считает, что «...налоговый риск в категорию финансовых рисков не входит, так как сам по себе не следует из природы финансовых операций, а обусловлен действиями налогоплательщика или органов государства по отношению к налогоплательщику» [10, с. 8]. По мнению автора, эта позиция является спорной, поскольку последствия налоговых рисков проявляются в финансово-экономических результатах деятельности хозяйствующего субъекта.

Ряд зарубежных авторов, среди которых Catalina Cozmei и Elena Claudia Serban [18], также полагают, что налоговый риск состоит в том, что компании не уверены в правильности применения положений налогового законодательства в своей деятельности, поэтому делается вывод, что управление налоговыми рисками — это предотвращение или сведение налоговых споров к минимуму [19], [20].

Авторы второго подхода: А. В. Брызгалин, И. Н. Демчук, И. Я. Лукасевич, Ф. Н. Филина, Д. М. Щекин, А. Г. Иванян, А. Ю. Че, Н. А. Павленко, Н. Пятницкий — рассматривают налоговые риски с позиций организаций и государства как возможные неблагоприятные финансовые и иные последствия в результате действий или бездействий участников налоговых правоотношений [21] – [24], [10], [25] – [27].

В этой группе считают, что налоги, как инструмент перераспределения ресурсов в экономике, сами по себе являются носителями риска для всех участников налоговых отношений. Поэтому необходимо рассматривать понятие «налоговый риск» с позиции не только налогоплательщиков, но и налоговых агентов, а также других субъектов налоговых правоотношений, включая государство. Для позиционирования налоговых рисков в структуре внутрифирменных экономических отношений А. И. Плотникова выполнила систематизацию научных подходов к определению экономических рисков предприятия [28].

Таким образом, под налоговым риском следует понимать опасность для субъекта налоговых правоотношений понести финансовые и иные потери, связанные с процессом налогообложения, вследствие негативных отклонений, основанных на действующих и перспективных нормах права, из расчета которых принимаются управленческие решения, а также в результате действий или бездействия органов государства и органов местного самоуправления.

А. Г. Иванян и А. Ю. Че, соединяя «налог» и «риск», дают свое определение «налоговому риску», под которым, они, подразумевают опасность возникновения непредвиденного отчуждения денежных средств налогоплательщика из-за действий (бездействия) государственных органов и (или) органов местного самоуправления [25].

Ф. Н. Филина уточняет, что налоговый риск возникает вследствие негативных отклонений законодательных норм в будущем при планировании налоговых обязательств в настоящем [24].

По мнению И. Н. Демчука, отсутствует комплексный подход к определению содержания налоговых рисков, так как выделяется и обосновывается только один-два фактора их возникновения. Специалисты юридической практики, как правило, выделяют один комплексный фактор — несовершенство налогового законодательства и неточность формулировок в нем [22].

А. В. Брызгалин также видит налоговый риск как возможность негативных последствий, вызванная определенными налоговыми факторами [21].

По мнению Н. А. Павленко, налоговые риск — это финансовая (денежная) оценка негативных последствий нерациональных действий (или бездействия) конкретного лица или группы лиц в организации в области управления налоговыми обязательствами [26].

Н. Пятницкий формулирует налоговый риск как возможное наступление неблагоприятных последствий для налогоплательщика в результате действия внешних и внутренних факторов. При этом под внешними факторами понимается несовпадение правовых позиций, а под внутренними — выявление нарушений применения норм налогового законодательства, в результате которых возникают излишне начисленные суммы налогов. [27].

Третий подход признает налоговые риски как полноценную разновидность экономических рисков (П. Бернар, Ж.-К. Колли, Л. И. Гончаренко, А. Зуйков, Я. Шишкина, Д. Н. Тихонов, Л. Г. Липник, Б. А. Райзберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева, С. А. Филин, И. Н. Демчук, А. Е. Шевелев, Е. В. Шевелева, А. А. Пилипенко, М. Р. Пинская, И. А. Лисовская, Э. Л. Калашникова, А. Е. Богданова, М. И. Мигунова) [29] – [36], [22], [4], [3], [17], [37] – [39]. По мнению Л. И. Гончаренко, именно комплексный подход к определению родовых признаков понятия экономических рисков позволяет включить в их состав налоговые риски, так как им присущи как материальные, так и нематериальные негативные последствия [31].

Налоговый риск, как правило, связан с финансовыми потерями в денежной форме. Но можно и шире рассмотреть это понятие. Так, при проведении налоговой проверки есть риск обеспечительных мер: выемка документов, арест имущества и т. д.

Л. И. Гончаренко и М. И. Мигунова уточняют, что «...налоговый риск — это неопределенность относительно достижения целей хозяйствующего субъекта в результате воздействия факторов, связанных с процессом налогообложения, которая может проявиться в виде финансовых (и иных) потерь или в возможности получения дополнительной выгоды (дохода) в результате позитивных отклонений» [30], [35].

Комплексный подход поддерживает и М. Р. Пинская, определяя налоговый риск как «...вероятность ущерба или для налогоплательщика (в виде возможного ослабления его финансово-экономического потенциала), или для государства (в виде возможного недополучения им налоговых платежей) из-за неадекватных действий (бездействия) налогоплательщиков и уполномоченных государственных органов» [17].

И. Н. Демчук считает, что налоговые риски, являясь составной частью финансовых, проявляются и на государственном уровне в виде недополучения налоговых доходов в бюджетную систему, ухудшения налогового климата в стране [22].

А. Е. Шевелев и Е. В. Шевелева считают, что налоговый риск — это вид хозяйственного риска, возникающий при взаимодействии государства и налогоплательщика при формировании государственного бюджета [4]. Это мнение развивают Г. А. Цыркунова и М. И. Мигунова, утверждая, что «...налоговые риски представляется целесообразным рассматривать как разновидность рисков финансовых, поскольку они имеют денежное выражение и влекут за собой повышение расходов» [22], [35]. Д. Н. Тихонов и Л. Г. Липник также обращают внимание на то, что «...налоговые риски могут повлечь финансовые и иные потери, связанные с процессом уплаты и оптимизации налогов, выраженные в денежном эквиваленте» [33].

И. А. Лисовская относит налоговые риски к категории чистых рисков, так как их реализация приносит хозяйствующему субъекту финансовые и иные потери. Масштаб этих потерь может быть значительным, в результате чего может создаваться угроза экономической безопасности организации [37].

Аналогичной позиции придерживается и Э. Л. Калашникова, утверждая, что налоговые риски проявляются «...в виде вероятности наступления для налогоплательщика неблагоприятных экономических последствий, включая изъятие имущества в пользу бюджета, в виде дополнительных сумм налогов, налоговых санкций и пени вследствие асимметрии информации, человеческого фактора и негативных изменений в финансово-хозяйственной деятельности налогоплательщика» [38].

По мнению А. Зуйкова, для каждого участника налоговых правоотношений налоговые риски будут иметь различные формы проявления [32].

Однако необходимо учитывать, что налоговый риск это не только доначисления, но и переплата налогов, неиспользование налоговых льгот, налоговых резервов, кредитование бюджета, т. е. риски неэффективного налогообложения.

Ряд авторов, рассматривая налоговые риски с позиций налогоплательщиков, определяют их как «опасность возникновения непредвиденных потерь ожидаемой прибыли, дохода или имущества, денежных средств, других ресурсов в связи со случайным изменением условий экономической деятельности, неблагоприятными обстоятельствами», и как «элемент неопределенности, который может отразиться на деятельности того или иного хозяйствующего субъекта или на проведении какой-либо экономической операции» [29, с. 500], [36, с. 21–31].

Налоговые риски, по мнению А. Е. Богдановой следует рассматривать как комплексное экономическое явление, которое включает в себя не только вероятность доначисления налогоплательщику налогов (сборов), пеней и штрафов в ходе налоговой проверки, риск возрастания налоговой нагрузки, риски переплаты налогов, возможную утрату льгот, но и налоговую ответственность за реализацию рискованных последствий, связанных с несовпадением правовых позиций налогоплательщика и правоприменительных органов в отношении трактовки норм налогового законодательства [39].

Ученые, которые придерживаются четвертого подхода, рассматривают налоговые риски с точки зрения налоговой, административной, уголовной ответственности для организаций.

По мнению А. В. Бобровой и Л. Г. Ильинской, налоговые риски в предпринимательстве — это вероятность возникновения ответственности за действие налогоплательщика по снижению налогов в ходе предпринимательской деятельности при условии квалификации этих действий налоговыми органами как налогового правонарушения или налогового преступления [40, с. 106].

Выполненный анализ научных точек зрения на «налоговый риск» позволяет сделать вывод о его многоаспектной характеристике и широком применении в законодательной, научной и практически направленной литературе. Предложенная систематизация может быть использована в качестве методической основы при формулировании сущности налоговых рисков для отраслевых организаций, в частности — водного транспорта, с целью выработки эффективных управленческих решений по регулированию оптимального внутрифирменного налогообло-

жения. Это очень важно для универсальной взаимообусловленности действий государства и бизнеса. В условиях финансово-экономического кризиса категория «налоговый риск» способна стать основой построения делового партнерства, его синергетической составляющей для разрешения возникающих противоречий. Целостно-системная картина налогового риска невозможна без соответствующих гибких конструкций в законодательстве с целью интегрирования отдельных его элементов.

В данном контексте налоговый риск следует рассматривать как экономико-правовую модель предполагаемых отрицательных последствий деятельности как государства, так и налогоплательщиков в целях разрешения существующих между ними концептуальных противоречий в конкретных обстоятельствах.

В условиях рыночных отношений с налоговым риском может сталкиваться хозяйствующий субъект водного транспорта (компания, предприятие, предприниматель без образования юридического лица и т. д.), группа персонала, отдельный работник, а также государство в лице органов управления. Ситуации неопределенности и риска являются характерным аспектом судоходной деятельности, поэтому важно разработать эффективную корпоративную систему риск-менеджмента, включающую и управление налоговыми рисками.

В ряде научных работ Е. А. Лаврентьевой, Г. А. Плавинской, Е. Д. Голоскоковой, Л. Н. Корельской исследовались разные аспекты особенностей налогообложения судоходного бизнеса [41] – [48]. Однако цель, задачи, методы, инструментарий управления налоговыми рисками (как разновидностью экономических), для судоходной деятельности рассмотрены недостаточно. Поэтому второй и третий научные подходы взяты авторами за основу в качестве наиболее актуальных и комплексных в современных условиях.

По мнению авторов, источники неопределенности во внутрифирменной налоговой политике весьма многообразны, а налоговые риски могут порождаться различными факторами, влияющими на эксплуатационно-экономическую результативность судоходной деятельности. При этом генераторами риска могут выступать лица, действия которых являются результатом сознательных устремлений, связанных с определенными интересами в лоббировании изменений законодательства о налогах и сборах, уклонении от налогообложения, минимизации налоговой нагрузки и т. д. Формирование благоприятной среды для успешного развития и повышения конкурентоспособности судоходной деятельности требует качественного управления налоговыми рисками путем их выявления, снижения и устранения.

На основании проведенных авторами исследований, выполненных обобщений и систематизации научных подходов для судоходных компаний предлагается рассматривать управление налоговыми рисками как важный элемент в системе внутрифирменного финансово-экономического риск-менеджмента для предотвращения снижения конкурентоспособности, сокращения или ликвидации перевозок (вследствие повышения налоговой нагрузки, роста доли налоговых расходов в тарифах, отказа контрагентов от договорных отношений при нерациональном применении специальных налоговых режимов, развития теневого судоходного бизнеса недобросовестных налогоплательщиков и др.), снижения финансово-экономических результатов, ресурсов и имущественного комплекса (в виде упущенной выгоды и убытка, недополучения дохода и прибыли, потери собственных средств, штрафов и пеней, ограничений операций по счетам, ареста имущества и др.), роста текучести персонала (за счет влияния налоговых расходов на снижение доходов и социальной защиты работников).

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что управлять налоговыми рисками — значит прогнозировать наступление рискованного события, организовывать, регулировать, координировать, стимулировать и контролировать наступление положительного или отрицательного результата деятельности судоходных компаний. Взвешенное управление налоговыми рисками может помочь организации повысить эффективность бизнес-модели, увеличив ее ликвидность в условиях непростой экономической ситуации в стране.

Список литературы

1. *Даль В. И.* Толковый словарь живого великорусского языка: в 4 т. / В. И. Даль. — М.: АСТ, Астрель, 2001. — Т. 4. — 1152 с.
2. *Ожегов С. И.* Словарь русского языка / С. И. Ожегов; под ред. Н. Ю. Шведовой. — 14-е изд., стер. — М.: Рус. яз., 1983. — 816 с.
3. *Пилипенко А. А.* Научно-прикладные подходы к пониманию налоговых рисков / А. А. Пилипенко // СПС КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://normapravaspb.ru/?utm_source=yandex&utm_campaign=8934_adhands&utm_medium=cpc&utm_content=1802340 (дата обращения: 16.02.2015).
4. *Шевелев А. Е.* Риски в бухгалтерском учете: учеб. пособие / А. Е. Шевелев, Е. В. Шевелева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: КноРус, 2008. — 302 с.
5. *Чернова Г. В.* Управление рисками: учеб. пособие / Г. В. Чернова, А. А. Кудрявцев. — М.: Проспект, Велби, 2003. — 158 с.
6. *Уродовских В. Н.* Управление рисками предприятия: учеб. пособие / В. Н. Уродовских. — М.: Вузовский учебник, ИНФРА, 2010. — 167 с.
7. *Шапкин А. С.* Экономические и финансовые риски: оценка, управление, портфель инвестиций / А. С. Шапкин. — М.: Дашков Кш, 2004. — 543 с.
8. *Вишняков Я. Д.* Общая теория рисков: учеб. пособие / Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. — М.: Академия, 2007. — 362 с.
9. *Тэпман Л. Н.* Риски в экономике: учеб. пособие для вузов / Л. Н. Тэпман; под ред. проф. В. А. Швандара. — М.: ЮНИТИ-Дана, 2002. — 379 с.
10. *Щекин Д. М.* Налоговые риски и тенденции развития налогового права / Д. М. Щекин; под ред. С. Г. Пепеляева. — М.: Статут, 2007. — 236 с.
11. *Плотникова А. И.* Анализ научных позиций в определении внутрифирменных налоговых рисков / А. И. Плотникова // Материалы V межвуз. науч.-практ. конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 14 мая 2014 г. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2014. — С. 440–445.
12. *Балабанов И. Т.* Риск-менеджмент / И. Т. Балабанов. — М.: Финансы и статистика, 1996. — 187 с.
13. *Тоцкая К. П.* Развитие методов управления налоговыми рисками в организации: диссертация / К. П. Тоцкая. — Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2012. — 207 с.
14. *Содномова С. К.* Трансформация рисков при осуществлении налогового контроля / С. К. Содномова // Известия ИГЭА. — №2 (88). — С. 14–18.
15. *Козенкова Т. А.* Налоговое планирование на предприятии / Т. А. Козенкова. — М.: АиН, 1999. — 64 с.
16. *Пансков В. Г.* Налоги и налогообложение: теория и практика: учебник / В. Г. Пансков. — М.: Юрайт, 2011. — 680 с. — С. 227.
17. *Пинская М. Р.* Налоговый риск: сущность и проявление / М. Р. Пинская // Финансы. — 2009. — № 2. — С. 16–19.
18. *Cozmei C.* Risk management triggers: from the tax risk pitfalls to organizational risk / C. Cozmei, E. C. Serban [Electronic resource]. — URL: http://ac.els-cdn.com/S2212567114006303/1-s2.0-S2212567114006303-main.pdf?_tid=1e6c1978-b05c-11e4-83df-00000aacb361&acdnat=1423487222_06b60f07b970e4dca44e714a3f123f1b (access date: 09.02.2015).
19. Tax risk management strategy. Vodafone Limited [Electronic resource]. — URL: http://www.vodafone.com/content/dam/sustainability/pdfs/vodafone_tax_risk_management_strategy.pdf (access date: 09.02.2015).
20. Tax Risk and Dispute Management. KPMG Services Pte. Ltd. [Electronic resource]. — URL: <http://www.kpmg.com/SG/en/kpmginstitutes/TaxInstitute/Documents/TRDM-jun2012.pdf> (access date: 09.02.2015).
21. *Брызгалин А. В.* Налоговые риски: осведомлен — значит, вооружен / А. В. Брызгалин // Налоговые споры. — 2009. — № 4. — С. 12.
22. *Демчук И. Н.* Налоговый риск: сущность и содержание понятия / И. Н. Демчук // Вестник Томского государственного университета. — 2010. — № 1 (9). — С. 10–15.
23. *Лукашевич И. Я.* Финансовый менеджмент / И. Я. Лукашевич. — М.: Эксмо, 2011. — 764 с.

24. *Филина Ф. Н.* Анализ налоговых рисков / Ф. Н. Филина [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://rosbuh.ru/?page=article&item=1467> (дата обращения: 04.02.2015).
25. *Иванян А. Г.* О налоговых рисках / А. Г. Иванян, А. Ю. Че // Налоговый вестник. — 2007. — № 10 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.lawmix.ru/bux/61293/> (дата обращения: 04.02.2015).
26. *Чурилкина Е. В.* Налоговые риски: Сущность, причины возникновения, методы управления / Е. В. Чурилкина, О. В. Дерина // Электронный журнал МГУ им. Н. П. Огарева [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://sisupr.mrsu.ru/2011-4/PDF/13/Churilkina.pdf> (дата обращения: 04.02.2015).
27. *Пятницкий Н.* Налоговые риски и уголовная ответственность за налоговые преступления / Н. Пятницкий // Налоги и налоговое планирование. — 2011. — № 1 — С. 37–42.
28. *Плотникова А. И.* Анализ научных подходов к определению экономических рисков предприятия / А. И. Плотникова // IV межвузовская науч.-практ. конференция аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России»: межвузовский сб. науч. трудов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — С. 576–581.
29. *Бернар П.* Толковый экономический и финансовый словарь: французская, русская, английская, немецкая, испанская терминология: в 2 т. / П. Бернар, Ж.-К. Колли; пер. с франц. — М.: Межд. отношения, 1994. — Т. 2. — 500 с.
30. *Гончаренко Л. И.* Налоговые риски: теория и практика управления / Л. И. Гончаренко. // Финансы и кредит. — 2009. — № 2. — С. 30–31.
31. *Гончаренко Л. И.* Налоговые риски: теоретический взгляд на содержание понятия и факторы возникновения / Л. И. Гончаренко // Налоги и налогообложение. — 2009. — № 1.
32. *Шишкина Я.* Управление налоговыми рисками: мнение специалиста / Я. Шишкина // Налоговый учет для бухгалтера [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.delo-press.ru/articles.php?n=5606> (дата обращения: 04.02.2015).
33. *Тихонов Д. Н.* Налоговое планирование и минимизация налоговых рисков / Д. Н. Тихонов, Л. Г. Липник. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. — 153 с.
34. *Райзберг Б. А.* Современный экономический словарь / Б. А. Райзберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева. — М.: ИНФРА М, 2006.
35. *Мигунова М. И.* Финансовые риски в налоговом планировании: диссертация / М. И. Мигунова. — Новосибирск: Изд-во Новосибирский государственный университет экономики и управления, 2006. — 208 с.
36. *Филин С. А.* Финансовый риск и его составляющие для обеспечения процесса оценки и эффективного управления финансовыми рисками при принятии финансовых управленческих решений / С. А. Филин // Финансы и кредит. — 2002. — № 3. — С. 21–31.
37. *Лисовская И. А.* Налоговые риски: понятие, факторы возникновения, методы управления / И. А. Лисовская // Новый университет. — 2011. — № 2. — С. 3–13.
38. *Калашникова Э. Л.* Налоговые риски: оценки и их финансовые последствия: диссертация / Э. Л. Калашникова. — Иркутск: Изд-во Байкальский Государственный университет экономики и права, 2007. — 180 с.
39. *Богданова А. Е.* Совершенствование управления налоговыми рисками, обеспечивающего экономический рост предприятия / А. Е. Богданова // Материалы XVI Всероссийского конкурса научных работ молодежи. — М.: ФГБОУ ВПО СПбГАУ, 2013.
40. *Боброва А. В.* Оценка и анализ налоговых рисков в предпринимательстве / А. В. Боброва, Л. Г. Ильинская // Вестник ЮУрГУ. — 2011. — № 41. — С. 106–112.
41. *Лаврентьева Е. А.* Концептуальные основы налогового потенциала организаций водного транспорта / Е. А. Лаврентьева // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 1. — С. 67–71.
42. *Лаврентьева Е. А.* Налоговые аспекты при страховании ответственности за причинение вреда в морском судоходном бизнесе / Е. А. Лаврентьева // Налоги и финансовое право. — 2012. — № 3. — С. 167–171.
43. *Лаврентьева Е. А.* Страхование ответственности за причинение вреда в судоходном бизнесе: налогообложение, организация и правовое обеспечение: монография / Е. А. Лаврентьева. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 171 с.
44. *Лаврентьева Е. А.* Гарантии государства флага / Е. А. Лаврентьева, Е. Д. Голоскокова // Морские вести России. — М.: Морские вести, 2007. — № 23.

45. Лаврентьева Е. А. Методические подходы к налоговому регулированию для обеспечения конкурентоспособности портовой транспортно-экспедиционной деятельности / Е. А. Лаврентьева, Л. Н. Корельская // *Налоги и финансовое право*. — 2013. — № 5. — С. 122–128.
46. Лаврентьева Е. А. Коварный НДС / Е. А. Лаврентьева, Г. А. Плавинская // *Морские порты*. — 2010. — № 8. — С. 44–47.
47. Лаврентьева Е. А. Налоговое регулирование: теория и практика (на примере судоходного бизнеса): монография / Е. А. Лаврентьева, Г. А. Плавинская. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2007. — 148 с.
48. Лаврентьева Е. А. Особенности налогообложения деятельности судов, зарегистрированных в Российском международном реестре / Е. А. Лаврентьева, Г. А. Плавинская // *Налоги и финансовое право*. — 2014. — № 12. — С. 54–60.

УДК 338.24, 332.142

М. Ю. Андреева,
канд. экон. наук, доц.

СЕВЕРНЫЙ МОРСКОЙ ПУТЬ В ПОЛИТИКЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПРОРЫВА РОССИИ: НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ И ПРЕДПОСЫЛКИ

SOME ASPECTS AND ASSESSMENT OF NSR AS A WAY OF ECONOMIC RISING OF RUSSIA

В статье рассматриваются вопросы, связанные с реализацией проектов по формированию территории опережающего развития в Арктике на примере организации судоходства по трассам Северного морского пути. Проведен анализ реализации концептуально нового подхода к развитию СМП в контексте основополагающих документов по развитию морского флота и освоению Арктического побережья. Дан краткий ретроспективный обзор организации судоходства по трассам СМП в СССР. Особый акцент сделан на дальнейшее развитие государственно-частного партнерства, повышение ответственности бизнеса, выделены частные корпорации, получающие возвратное финансирование из Фонда национального благосостояния. Сделаны выводы о необходимости синхронизации процессов развития СМП и основополагающих инвестиционных проектов. Обоснована необходимость организации прогнозирования, планирования и стратегического управления судоходством по трассам СМП, определен субъект их реализации.

The analysis of the implementation of conceptually new approach to the development of NSRs in the context of the basic documents for the development of the navy and the reclamation of the Arctic coast has been carried out. A brief retrospective review of the organization of shipping along the NSR in the USSR is given. Particular emphasis is placed on the further development of public-private partnership and increase of business' responsibility. Private corporations that receive recurrent funding from the National Welfare Fund have been marked. The author makes conclusions about the need to synchronize the processes of development of NSRs and fundamental investment projects. The forecast, planning and strategic management of shipping on the highway NSRs are shown to be valuable so the subject of their implementation is defined.

Ключевые слова: территории опережающего развития, Арктика, Северный морской путь, государственное регулирование.

Key words: Areas of priority development, the Arctic, the Northern Sea Route, government regulation.

В ПЕРИОДЫ кризисного развития экономики, особенно в периоды понижительной волны большого цикла, который мы наблюдаем в настоящее время, на повестку дня встает вопрос об участии государства в экономике. Построение основ рыночной экономики, проводимое в России на протяжении последних десятилетий, последовательно снижало вовлечен-

ность государства в бизнес-процессы, ситуация стала меняться во время кризиса 2008 г., когда не только страны с переходной экономикой, но и США усилили участие государства в экономике — прежде всего, через инвестиционный спрос.

Во второй половине 2014 г. в результате введения экономических санкций со стороны ЕС и США, Россия оказалась в условиях, при которых внешние заимствования на крупнейших мировых финансовых рынках стали ей недоступны. Ситуация усугубилась тем, что санкции были наложены не только на государство в целом, но и на отдельные секторы экономики. Наибольший урон понесли финансовый и энергетический секторы. Последовательно проводимая Россией политика отстаивания своих геополитических интересов приводит к дальнейшему ужесточению санкций, противостоять которым возможно только на основе подъема экономики. Вопросы поиска источников развития, точек роста находятся в постоянном мониторинге руководства страны. Ставится вопрос о поиске нового, мобилизационного характера развития при котором будут а) обеспечены реальные темпы роста и б) рост будет достигнут в условиях жесткой ограниченности капитала. Дефицит бюджетных средств и ограниченность Фонда национального благосостояния диктуют необходимость определения «точки экономического роста» и «территорий опережающего развития», им отведена роль локомотивов по выводу экономики из кризиса.

Одной из таких территория является зона Арктики, внутри которой можно выделить в качестве основных точек роста проекты «Ямал СПГ» и «Северный морской путь» (СМП). Объединяющими характеристиками последних кроме территориальной расположенности выступают общие принципы организации финансирования — использование государственных и частных инвестиций с последующей реализацией проектов в форме государственно-частного партнерства. Оба проекта взаимосвязаны — успешность развития Северного морского пути будет способствовать развитию транспортной логистики и снижению затрат по перевозке грузов; «Ямал СПГ», в свою очередь, повысит грузопоток по СМП.

Перспективам, задачам, проблемам развития Северного морского пути посвящено значительное количество публикаций. Большой вклад в комплексное изучение вопроса внесли разработки ЦНИИМФ, Российской академии транспорта, ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. В доперестроечные годы были разработаны принципы планирования и организации работы флота в Арктике, в частности: разработаны принципы сетевого планирования работы флота [1], основы выбора оптимального вида ледокольной проводки [2], [3], основы организации управления Арктической морской транспортной системой с точки зрения народнохозяйственных позиций [4]. В 1990 – 2000 гг. произошло существенное сокращение перевозок по трассам СМП, сопровождавшееся старением ледокольного флота, портовых сооружений, упадком российского судоходства в целом. Ситуация начала меняться с принятием основополагающих целевых документов: «Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу», Морской доктрины РФ, ФЦП Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 гг.). Акцент в реализации стратегических задач был изначально сделан на государственно-частное партнерство [5], однако результаты его реализации, по крайней мере в части софинансирования, не могут быть признаны удовлетворительными.

Вопросы развития ГЧП, механизма его регулирования не были обусловлены введением экономических санкций, они существовали на протяжении многих лет [6] – [8], изменившиеся условия развития экономики в 2015 г. актуализировали необходимость гармонизации этих процессов. Вероятно, новые экономические реалии приведут к изменению взаимоотношений государства и бизнеса, повысят ответственность последнего, прежде всего, при условии финансирования инвестиционных проектов из Фонда национального благосостояния. Остановимся подробнее на анализе взаимодействия различных по форме собственности хозяйственных структур в ходе реализации проектов СМП и «Ямал СПГ».

Судоходное использование СМП берет свое начало в 1933 г., общий объем перевезенных грузов и их распределение с 1933 по 2013 гг. представлены на рис. 1. Как видно, в «перестроечный» период объем перевозок значительно ниже достигнутого в 1990-х гг.

Курс на освоение Арктики, принятый в начале 2000-х гг., сформулированный в названных основополагающих документах, последовательно реализуется, что не замедлило принести результаты. Динамика грузоперевозок по трассам СМП и прогнозы до 2016 г. приведены в таблице. Аналитический прогноз составлен на основе модели многомерной линейной регрессии.

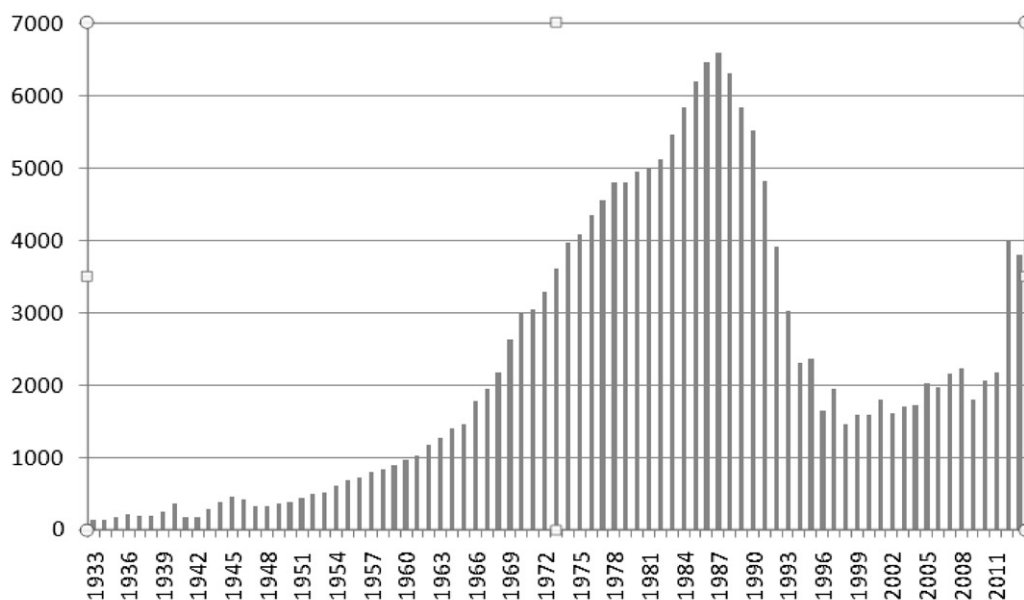


Рис. 1. Объем перевезенных грузов по трассам Северного морского пути, млн т., за период с 1933 по 2013 гг.¹

Таблица

Объем перевозок по трассам СМП: прогноз и факт²

Годы	Аналитический прогноз на основе многомерной линейной регрессии	Экспертный прогноз, тыс. т	Аналитический прогноз, скорректированный с учетом факта 2012 г., тыс. т	Фактически перевезено, тыс. т
2010	—	—	—	2050, в том числе транзитные перевозки — 111
2011	—	—	—	2170, в том числе транзитные перевозки — 840
2012	2,332	2300	—	4000, в том числе транзитные перевозки — 1200
2013	2,514	2600	4250	3800, в том числе транзитные перевозки — 1176
2014	2,728	2800	4400	Транзитные перевозки — 271
2015	2,982	3000	—	—
2016	3,280	3500	—	—

Анализ прогнозных значений грузооборота существенно меняется при введении в многофакторную регрессионную модель фактических данных за 2012 г. (прогнозные значения увеличиваются в два раза). Отчетные данные 2014 г. говорят о существенном снижении транзитных перевозок (на 70 % по сравнению с 2013 г.). В случае их введения в модель, мы получим резкое изменение прогнозных значений — теперь в сторону резкого уменьшения.

¹ Составлено на основе данных источников [9] – [12].

² Составлено на основе данных источников [10] – [13].

График изменения объема транзитных перевозок за период 2010 – 2014 гг. (рис. 2) показывает существенную волатильность показателя транзитных перевозок по трассам СМП. Вместе с тем, объем выручки хозяйствующих субъектов определяется объемом перевозок и их ценой, что делает затруднительным долгосрочное финансовое планирование и несет значительные финансовые риски.

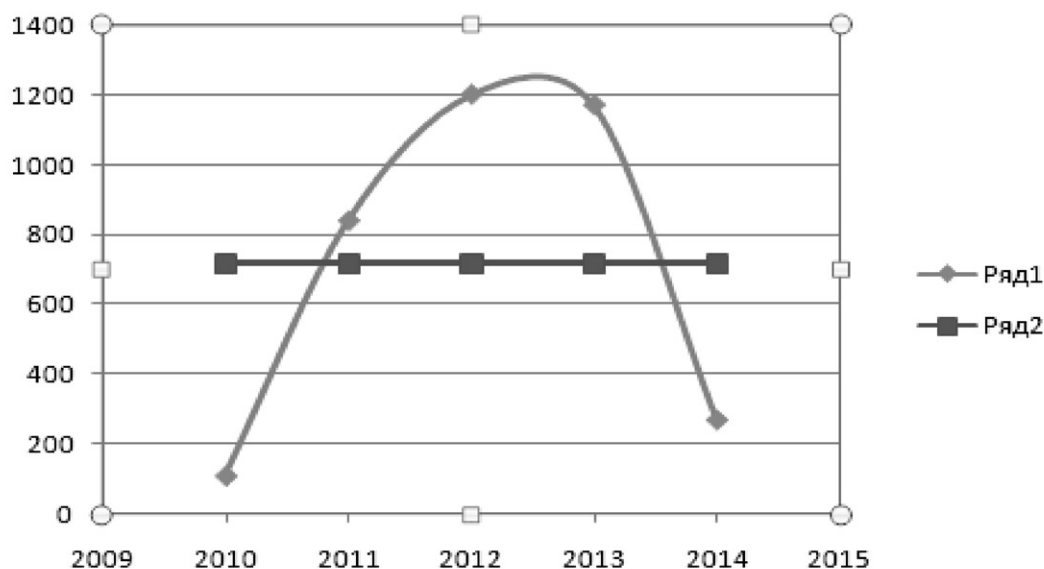


Рис. 2. Соотношение объема транзитных перевозок, млн. т, и средней величины перевозок за 2009 – 2014 гг.

Чем обусловлено резкое увеличение объема перевозок 2010 – 2012 гг. и их резкое снижение в 2014 г.? Прежде всего, природно-климатическими факторами. Арктика — зона неустойчивого судоходства. Ледовые условия в морях зависят не только от температуры воздуха, но и от степени солености воды, интенсивности течения, состояния глубинного льда, направления ветра и проч. Навигационные характеристики льда значительно отличаются от одной навигации к другой. Если ледовые условия 2010 – 2012 гг. были благоприятными для судоходства, что породило оптимистические настроения и версию о таянии льдов, то навигация 2014 г. была сложной и коммерчески неэффективной.

Во времена СССР развитие СМП осуществлялось за счет средств государственного бюджета, при переходе к рынку был разработан «концептуально новый подход к развитию СМП», в основу которого были положены следующие принципы [5]:

- государственная поддержка приоритетных отраслей экономики Севера;
- строительство дизель-электрических ледоколов в варианте универсальных ледоколов-снабженцев коммерческими предприятиями, осваивающими природные ресурсы региона;
- развитие судоходными компаниями и субъектами хозяйствования транспортного флота и нефтеперегрузочных терминалов за счет собственных и привлеченных средств при минимальном участии государства;
- финансирование текущих расходов на содержание ледокольного флота за счет средств, поступающих от оплаты услуг ледокольного флота по тарифам, регулируемым в установленном порядке;
- пополнение портовых ледоколов планировалось осуществлять силами собственников и администрациями морских арктических портов.

С момента доклада начальника СМП А. Г. Горшковского прошло десятилетие, в целом реализованы все основополагающие принципы. Вместе с тем СМП не вышел на объемы перевозок 1990-х гг. Многие перспективные проекты ресурсодобывающих компаний находятся на стадии запуска [14], разобщенность функционирования хозяйствующих субъектов, различная подчинен-

ность, организационные структуры и формы собственности последних приводят к конфликтам интересов и снижению синергетического эффекта. С этих позиций обоснованным и целесообразным выглядит предложение по формированию арктического кластера [15].

Законодательная основа организации судоходства по СМП заложена Правилами плавания в акватории Северного морского пути. С апреля 2013 г. введен разрешительный порядок плавания судов по трассам СМП. Правилами предусматривается порядок и сроки подачи заявок на прохождение по трассам СМП, определяется состав участников организации движения, их полномочия, устанавливают технические требования к судам с целью обеспечения экологической безопасности, а так же таблицы критериев допуска судов на Северный морской путь в соответствии с категорией их ледовых усилений [16].

Согласно Правилам основными субъектами организации движения выступают: *казенное предприятие* «Администрация Северного морского пути», *федеральное государственное унитарное предприятие* «Атомфлот» *госкорпорации* «Росатом» и суда, непосредственно проходящие по трассе. Администрация СМП осуществляет комплекс административных работ по выдаче разрешений на проход, координирует работу по организации ледокольной проводки, ледовой лоцманской проводки, гидрометеорологического обеспечения плавания судов в акватории Северного морского пути. «Атомфлот» непосредственно организует и осуществляет ледокольную проводку по трассам СМП на платной основе согласно тарифам на ледокольную проводку судов, установленных приказом № 45-т/1 от 4 марта 2014 г. [17].

Новые правила позволяют избежать ситуаций, подобных конфликту между «Атомфлотом» и ОАО ГМК «Норильский Никель», суть которого — отказ «Норильского Никеля» от ледовой проводки и неоплата ледокольного сбора, что, по мнению «Атомфлота», привело к недополучению корпорацией платежей на содержание государственного атомного ледокольного флота в размере 238,5 млн руб. в 2006 г.; 329,8 млн руб. в 2007 г.; 757,8 млн руб. в 2008 г.; на 2009 г. прогнозируется недобор в размере 1 млрд 608,4 млн руб. [18]. Согласно утвержденным правилам, суда ледового класса Arc7, к которым относятся контейнеровозы «Норильского никеля», за редким исключением (тяжелой ледовой обстановки в зимний навигационный период) могут осуществлять самостоятельное плавание в Карском море.

Каково сущностное отличие организации судоходства по СМП в советские годы от сегодняшней? Основу грузопотока в СССР составляла доставка грузов по обеспечению населенных пунктов Арктического побережья — северный завоз. Он осуществлялся с восточного и западного побережий. «В каждом отдельном случае, в зависимости от количества судов, проводимых во льдах, и расстояния, на которое осуществлялась проводка, Министр морского флота (начальник парокходства) назначал начальника ледокольных операций, которому *подчинялись все* (выделение автора) ледоколы, ледокольные буксирные катера, транспортные, вспомогательные и другие суда, предназначенные для работы в данном районе. Суда сторонних организаций, работающие в районе, подчинялись ему согласно особому положению, разрабатываемому Министерством морского флота совместно с организациями, которым принадлежат суда» [19, с. 73–74]. Количество груза к перевозке было заранее строго определено. В условиях планового хозяйства разрабатывались перспективные планы грузопотоков, исходя из которых, осуществлялась загрузка, расстановка флота, определялись потребности в ледоколах. На кромке льда формировались караваны судов, следовавших в населенные пункты. Время ожидания проводки, как правило, составляло 3 – 7 дней.

Согласно современным Правилам, заявка подается не ранее чем за 120 календарных дней и не позднее, чем за 15 рабочих дней до предполагаемой даты захода судна в акваторию Северного морского пути, что предполагает организацию движением в *оперативном* режиме. Навигация 2014 г. показала, что ледовая обстановка в Арктике может быть тяжелой и не всегда оправдывает прогнозы о таянии льдов. В этом случае потребность ледокольной проводки увеличивается, но количество ледоколов фиксировано. Основными пользователями СМП выступают судоходные компании, обслуживающие ресурсодобывающие предприятия. По мере выхода на плановую мощность первой очереди проекта «Ямал СПГ» количество танкеров-газовозов составит 16 единиц,

а частота отгрузки — один танкер в два дня. Ввод Нового порта потребует девять танкеров для перевозки. По мере развития производственной базы будет увеличиваться приток населения и возрастут потребности в заводе продуктов и товаров народного потребления. Если к этому добавить амбициозные планы по увеличению транзитного грузопотока, видится необходимым изменение концепции организации судоходства.

В силу различий в субъектной базе пользователей СМП (на смену единому заказчику, организатору и пользователю в лице государства при социализме пришли коммерческие предприятия с жесткими контрактными условиями) целесообразно заложить эти сущностно изменившиеся вводные в основу организации движения судов. В утвержденной Морской доктрине РФ на период до 2020 г. предусматривается государственное финансирование затрат на содержание, строительство и эксплуатацию ледоколов (рис. 3). Однако необходимость сокращения бюджетных расходов, по мнению экспертов, потребует оптимизации расходов «Росатома», в том числе — в части строительства ледоколов. Рассмотрение вопроса о выделении запланированных 70,3 млрд руб. в 2015 – 2017 гг. на строительство трех атомных ледоколов переносится на более поздние сроки и будет обсуждаться по мере реализации проекта «Ямал СПГ». На реализацию проекта «Ямал СПГ» по решению Министерства экономического развития выделено 150 млрд руб. за счет Фонда национального благосостояния, первый транш в сумме 75 млрд руб. был произведен 20.02.2015 г.¹ По договоренности сторон средства будут использованы на строительство газозавозов повышенной ледовой проходимости.



Рис. 3. Модель головного танкера для перевозки СПГ

Подводя итог, можно сделать следующие выводы:

- успешное развитие СМП является необходимым условием не только освоения Арктики, но и тем «звеном», «точкой роста», которая будет способствовать экономическому подъему России в целом;
- Федеральный закон Российской Федерации от 28 июля 2012 г. № 132-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории Северного морского пути» заложил правовую базу, определил структуру взаимоотношений и подчиненности субъектов [16];
- утверждены Тарифы на ледокольную проводку судов, оказываемую ФГУП «Атомфлот» в акватории Северного морского пути, что повышает прозрачность хозяйственных взаимоотношений;

¹ РИА Новости. 20.02.2015

– развитие СМП тесно связано с реализацией проектов по освоению природных богатств региона, в первую очередь — проекта «Ямал СПГ».

Вместе с тем, обращает на себя внимание несбалансированность отдельных принимаемых решений. Например, приостановка финансирования новых ледоколов, входит в противоречие с прогнозируемыми объемами увеличения перевозок по трассам СМП. Действующий порядок подачи заявок на проход по СМП фактически исключает долгосрочное планирование, что не позволит осуществить эффективную ледокольную проводку. Есть опасность, что при ухудшении ледовой обстановки имеющиеся в наличии ледоколы не смогут обеспечить потребности перевозчиков. В правилах и уставе Администрации северного морского пути (АСМП) хорошо прописаны организационная и разрешительная функции, но на взгляд автора необходимо наделить АСМП властными полномочиями, возложить на нее функции прогнозирования, планирования с элементами риск-менеджмента.

Особую роль в становлении СМП должны сыграть коммерческие организации, и прежде всего те из них, которые получают государственную финансовую поддержку. На взгляд автора, танкеры ледового класса Arc7, которые будут построены корпорацией «НОВАТЭК» за счет возвратного финансирования из Фонда национального благосостояния, могут по согласованию с АСМП, использоваться для организации прохода судов более низких ледовых классов в попутном следовании.

Развитие Северного морского пути определено в качестве стратегической задачи, только эффективное сотрудничество государства и бизнеса позволит решить ее в текущих экономико-политических условиях.

Список литературы

1. Александрович А. В. Принцип построения графика работы флота в Арктических районах / А. В. Александрович, Ю. М. Бацких // Совершенствование планирования развития морского флота: сб. науч. трудов. — Л.: ЦНИИМФ, 1983. — Вып. 284. — С. 52–54.
2. Бацких Ю. М. Фрагмент задачи расстановки ледоколов при обеспечении арктических перевозок / Ю. М. Бацких, Е. А. Пузанкова, А. И. Славников // Обоснование, планирование и организация работы флота: сб. науч. трудов / ЦНИИМФ. — Л.: Транспорт, 1984. — С. 34–37.
3. Бузев А. Я. Учет влияния ледяного покрова при выборе оптимального вида ледокольной проводки морских судов / А. Я. Бузев, В. Ф. Дубовцев // Обоснование, планирование и организация работы флота: сб. науч. трудов / ЦНИИМФ. — Л.: Транспорт, 1979. — Вып. 241. — С. 66–74.
4. Арикайнен А. И. Особенности формирования структуры ледокольного флота с народнохозяйственных позиций / А. И. Арикайнен // Обоснование, планирование и организация работы флота: сб. науч. трудов — Л.: ЦНИИМФ, 1988. — С. 99–104.
5. Горшковский А. Г. Северный морской путь — настоящее и будущее / А. Г. Горшковский. — [Электронный ресурс]. — [www.northernmaritimecorridor.no/.../ Russian%20Speech% 20Anatoly%](http://www.northernmaritimecorridor.no/.../Russian%20Speech%20Anatoly%2002.2015) (дата обращения: 20.02.2015).
6. Варнавский В. Г. Партнерство государства и частного сектора: формы, проекты, риски / В. Г. Варнавский. — М.: Наука, 2005.
7. Государство и бизнес: институциональные аспекты / отв. ред. И. М. Осадчая. — М.: ИМЭМО РАН, 2006.
8. Ионова Ю. Г. Государственные инвестиции — спасение национальной экономики? / Ю. Г. Иванова // Финансы, деньги, инвестиции. — М.: Финформсервис Ника, 2012. — № 1. — С. 37–42.
9. Половинкин В. Н. Перспективные направления и проблемы развития Арктической транспортной системы Российской Федерации в XXI веке / В. Н. Половинкин, А. Б. Крылова // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 3 (7). — С. 74–83.
10. Движение по Северному морскому пути переживает спад // Мурманский вестник [Электронный ресурс]. — <http://www.mvestnik.ru/shwpgn.asp?pid=2014121856> (дата обращения: 20.01.2015).

11. Доклад руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта (Росморречфлот) Давыденко А. А. «Об основных итогах работы морского и внутреннего водного транспорта в 2012 г.» / А. А. Давыденко. — [Электронный ресурс]. — http://www.korabel.ru/news/comments/sostoyalos_rasshirennoe_zasedanie_soveta_federalnogo_agentstva_morskogo_i_rechnogo_transporta (дата обращения 20.01.2015).
12. Основные итоги деятельности морского и речного транспорта в 2012 году, задачи на 2013 год и среднесрочную перспективу до 2015 года / Официальный Интернет-ресурс Министерства транспорта РФ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.mintrans.ru/news/detail.php?ELEMENT_ID=19694 (дата обращения: 22.02.2015).
13. Киселенко А. Н. Разработка моделей прогнозирования перевозок по Северному морскому пути / А. Н. Киселенко, Е. Ю. Сундуков, И. В. Фомина // Информатика, математическое моделирование, экономика: сб. науч. статей — Смоленск: Смоленский филиал Российского университета кооперации, 2014.
14. Лебедев Г. В. Перспективы развития арктической морской транспортной системы / Г. В. Лебедев, Г. Е. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 179–189.
15. Ботнарюк М. В. Анализ состояния и перспективы развития северного морского пути / М. В. Ботнарюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 186–194.
16. Правила плавания в акватории Северного морского пути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rg.ru/2012/07/30/more-dok.html> (дата обращения: 20.02.2015).
17. Об утверждении тарифов на ледокольную проводку судов, оказываемую ФГУП «Атомфлот» в акватории северного морского пути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nsra.ru/files/fileslist/20140422101458ru> (дата обращения: 20.02.2015).
18. Состояние нормативной правовой базы использования государственного атомного ледокольного флота в целях обеспечения судоходства на трассах Северного морского пути. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rosatomflot.ru/index.php?menuid=20&artid=21&apage=2/> (дата обращения: 20.01.2015).
19. Петров М. В. Плавание во льдах / М. В. Петров. — Л.: Транспорт, 1955.

УДК 657.47:656.624.3

В. В. Крайнова,
канд. экон. наук, доц.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ КАЛЬКУЛИРОВАНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ПЕРЕВОЗОК В УПРАВЛЕНЧЕСКОМ УЧЕТЕ СУДОХОДНЫХ КОМПАНИЙ

IMPROVING SYSTEMS OF CALCULATION COST OF TRANSPORTATION IN MANAGEMENT ACCOUNTING SHIPPING COMPANIES

В современных условиях эффективное управление судоходными компаниями зависит от качества управленческих решений, которые принимаются в отношении оптимального использования всех видов ресурсов. Для повышения качества управленческих решений требуется непрерывное совершенствование их учетно-аналитического обеспечения, что, в свою очередь, требует пересмотра традиционных систем учета затрат и калькулирования себестоимости перевозок. Рассмотрены применяемые в отрасли методы учета затрат и калькулирования себестоимости: абсорпшен-костинг и директ-костинг; методы учета фактических и нормативных затрат; попроцессный, поперечный и позаказный методы. Основными научными результатами проведенного исследования являются: обоснование использования в управленческом учете судоходных компаний интеграции позаказного метода и метода директ-костинг; научно-обоснованная классификация затрат судоходных компаний на постоянные и переменные; разработка отраслевой структуры отчета о финансовых результатах при использовании в отрасли простого

директ-костинга; обоснование применения в отрасли развитого директ-костинга для расширения возможностей бюджетирования и бюджетного анализа.

In modern conditions the effective management of shipping companies depends on the quality of management decisions made in relation to the optimum use of all resources. To improve the quality of management decisions requires continuous improvement of their accounting and analytical support, which, in turn, requires a revision of the traditional cost accounting systems and calculation of the cost of transportation. The author examined the methods used in the industry cost accounting and cost calculation: absorption costing and direct costing; accounting methods and the actual regulatory costs; poprotsessny, poperedelny and custom methods. The main scientific results of the study are: rationale for use in management accounting shipping companies integration order of the method and the method of direct costing; evidence-based classification cost of shipping companies on fixed and variable; the development of the sectoral structure of the statement of financial performance when using the industry simple direct costing; the rationale for the use of industry-developed direct-costing for the empowerment of budgeting and budget analysis.

Ключевые слова: учет затрат, управленческий учет, калькулирование себестоимости, директ-костинг.

Key words: cost accounting, management accounting, calculation of cost, direct costing.

Введение

Учет затрат и калькулирование себестоимости перевозок являются одними из важнейших составляющих информационного поля управленческого учета. Традиционно себестоимость перевозок является одним из важнейших показателей финансово-хозяйственной деятельности судоходных компаний. В настоящее время организации внутреннего водного транспорта (ОВВТ) функционируют в таких условиях, когда рост доходной ставки от перевозок ограничен рядом факторов: конкуренцией, государственными мерами по контролю за тарифной политикой, уменьшением возможностей по формированию грузовой базы. Поэтому самым значимым резервом повышения эффективности деятельности судоходных компаний является экономия затрат, т. е. снижение себестоимости перевозок.

На сегодняшний день развитие внутреннего водного транспорта (ВВТ) определяется множеством различных факторов, важнейшим из которых является финансово-экономическое положение организаций отрасли [1]. Рассмотрим финансовые результаты ОВВТ от перевозок грузов и пассажиров в 2000 – 2013 гг. (табл. 1).

Таблица 1

Финансовые результаты от перевозок грузов и пассажиров ВВТ общего пользования в 2000 – 2013 гг. [2]

Показатели	Годы									
	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Доходы от перевозок грузов и пассажиров — всего, млрд руб., в том числе:	13,6	23,0	20,3	39,9	37,9	32,1	36,5	46,9	68,6	70,1
– грузов	12,6	20,7	18,1	35,7	34,4	28,1	31,9	41,9	62,3	63,0
– пассажиров	1,0	2,3	2,2	4,2	3,5	4,0	4,6	5,0	6,3	7,1
Расходы на перевозки грузов и пассажиров — всего, млрд руб., в том числе:	12,7	22,9	20,6	37,4	37,2	29,4	34,7	44,0	62,9	67,0
– грузов	11,6	20,2	18,1	33,0	33,0	24,9	29,3	37,8	55,7	59,2
– пассажиров	1,1	2,7	2,5	4,4	4,2	4,5	5,4	6,2	7,2	7,8

Таблица 1
(Окончание)

Прибыль, убыток (–) от перевозок грузов и пассажиров — всего, млрд руб., в том числе:	0,9	0,1	–0,3	2,5	0,7	2,7	1,8	2,9	5,7	3,1
– грузов	1,0	0,5	0,0	2,7	1,4	3,2	2,6	4,1	6,6	3,8
– пассажиров	–0,1	–0,4	–0,3	–0,2	–0,7	–0,5	–0,8	–1,2	–0,9	–0,7
Средняя себестоимость перевозок грузов, руб. за 10 т/км (тонно-километр)	1,8	2,9	3,1	3,8	5,2	4,7	5,4	6,4	6,9	7,4
Средняя себестоимость перевозок пассажиров, руб. за 10 пасс./км (пассажиро-километр)	12,8	38,4	38,7	45,7	53,5	58,8	67,5	77,5	120,0	130
Средняя доходная ставка от перевозок грузов, руб. за 10 т/км (тонно-километр)	1,9	2,9	3,1	4,1	5,4	5,3	5,9	7,1	7,7	8,8
Средняя доходная ставка от перевозок пассажиров, руб. за 10 пасс./км (пассажиро-километр)	11,5	32,7	34,6	43,8	44,2	52,7	57,5	71,4	105,0	118,3

За последние десять лет мы наблюдаем медленный и нестабильный рост финансовых результатов от перевозок. Это следствие опережающих темпов роста расходов над доходами.

Для дальнейшего эффективного развития отрасли необходима хорошо организованная система управления, которая базируется на качественном информационном обеспечении. Важнейшим «поставщиком» информации является бухгалтерский управленческий учет. Проведенные исследования в ряде судоходных компаний отрасли показали, что бухгалтерская информация на сегодняшний день удовлетворяет потребности управленческой деятельности лишь частично, и, по нашим наблюдениям, не является полноценной информационной базой для принятия менеджментом эффективных управленческих решений. Процесс развития отрасли диктует необходимость пересмотра традиционных систем учета затрат и калькулирования себестоимости.

Основная часть

В настоящее время в ОБВТ организация учета затрат и калькулирования себестоимости осуществляется с помощью разных методов, которые классифицируются по определенным признакам: объекту учета затрат, полноте учета затрат, оперативности учета и контроля (рис. 1).

По объектам учета различают позаказный, попередельный и попроцессный методы. Калькулирование полной и неполной себестоимости возможно по признаку полноты учитываемых издержек. Методы учета фактических и нормативных затрат выделяют в зависимости от оперативности учета и контроля затрат.

Важное отличие систем учета полной (абсорпшен-костинг) и неполной (директ-костинг) себестоимости состоит в порядке распределения постоянных производственных расходов между отчетными периодами. Абсорпшен-костинг представляет собой систему калькулирования себестоимости продукции с полным включением всех производственных затрат и распределением их ежемесячно между реализованной продукцией и запасами (готовой продукцией на складе, незавершенным производством и отгруженной, но не реализованной продукцией).

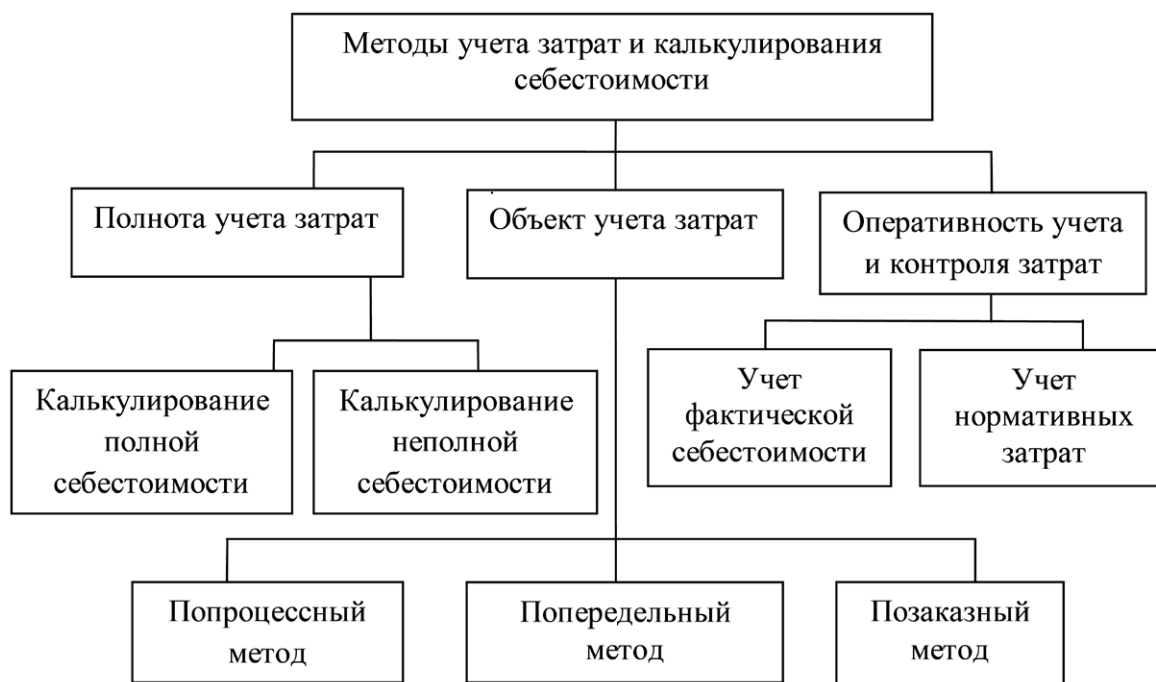


Рис. 1. Методы учета затрат и калькулирования себестоимости [3]

Директ-костинг — это система учета по переменным затратам, при которой формируется усеченная себестоимость без постоянных затрат. В основе директ-костинга лежит маржинальный подход. В себестоимости учитываются только переменные расходы, а постоянные общей суммой показываются отдельно. Поэтому менеджеры эксплуатационных предприятий получают возможность сосредоточить свое внимание на изменении именно переменных расходов, усилив контроль за ними.

Директ-костинг можно использовать при принятии многих управленческих решений в основном оперативного характера. Например, при установлении тарифов на дополнительные перевозки и трансфертном ценообразовании, при выборе альтернативного варианта, определении оптимального объема перевозок и т. д. [4] – [6]. Полная себестоимость важна при решении стратегических задач транспортной организации по ассортиментной и тарифной политике.

Выделяют три варианта метода директ-костинг: классический директ-костинг, при котором учитываются только прямые переменные затраты; директ-костинг, при котором калькулируются не только прямые переменные расходы, но и переменные косвенные; система директ-костинга, при котором в калькуляцию включаются все переменные расходы и часть постоянных расходов, определяемых в соответствии с выбранной базой распределения [7].

Директ-костинг по степени дифференциации постоянных затрат можно разделить на два основных варианта: простой директ-костинг, при котором постоянные затраты учитываются единым блоком; развитый (многоступенчатый) директ-костинг, при котором в организациях отрасли постоянные затраты делятся между видами перевозок и местами возникновения затрат. Так, например, к постоянным расходам мест возникновения затрат (судно) относятся: расходы по страхованию и аренде, амортизация флота. К постоянным расходам на вид перевозок (пассажиры, сухогрузы и т. д.) относятся расходы по содержанию вспомогательного флота.

При использовании системы простого директ-костинга используется двухступенчатая структура отчета о финансовых результатах, где формируется маржинальный доход и операционная прибыль (рис. 2).

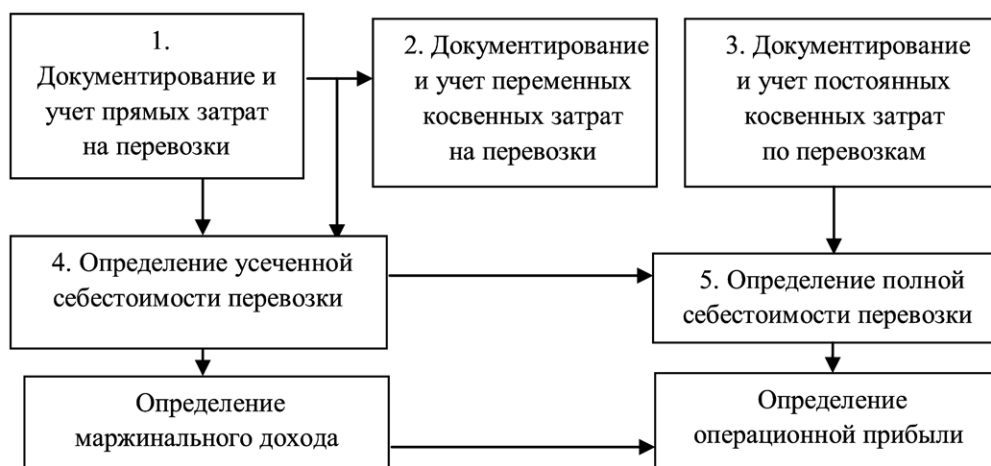


Рис. 2. Калькулирование себестоимости в организациях водного транспорта в системе простого директ-костинга

Представленная автором схема отражает отраслевую специфику водного транспорта и отличается от традиционной тем, что в ней не представлено распределение учтенных затрат между незавершенным производством и реализованными транспортными услугами ввиду отсутствия на эксплуатационных предприятиях отрасли незавершенного производства (процесс перевозки и ее потребление происходят одновременно).

Исследования, проведенные на ряде судоходных компаний, показали, что в отрасли нашел применение простой директ-костинг, который используется для решения управленческих задач в основном оперативного характера.

Применению метода директ-костинг предшествует классификация затрат на переменные и постоянные. Для этого широко используются статистические методы. Они подробно описаны в специальной литературе [3] – [8] и могут применяться предприятиями отрасли.

Для деления затрат по перевозкам на постоянные, переменные и смешанного типа применим корреляционно-регрессионный метод. Он позволяет установить зависимость затрат от грузооборота, измерить тесноту связи и построить для каждого вида затрат уравнение парной регрессии (табл. 2).

Таблица 2

Результаты корреляционно-регрессионного анализа (фрагмент)

Виды затрат	Уравнение парной регрессии	Коэффициент парной корреляции	Доля постоянных затрат, %	Доля переменных затрат, %
Топливо	$y = 3156 + 69x$	0,95	5,70	94,30
Дисбуртсменты	$y = 49 + 5x$	0,93	2,53	97,47
Навигационные сборы	$y = 153 + 4x$	0,96	3,75	96,25
Зарплата	$y = 6901 + 11x$	0,87	51,95	48,05
Страховые взносы	$y = 1922 + 3x$	0,86	53,29	46,71
Рацион бесплатного питания	$y = 416 + 3x$	0,94	17,29	82,71

Используя данные корреляционно-регрессионного анализа, представим классификацию расходов по перевозкам по отношению к объему перевозок (табл. 3).

Таблица 3

Классификация затрат по отношению к объему перевозок

Постоянные расходы	Переменные расходы	Смешанные затраты	
		Условно-постоянные	Условно-переменные
Страхование Амортизация судов Аренда судов	Топливо Дисбурсменты Навигационные сборы Масло Комплексное обслуживание флота	Заработная плата плавсостава Ремонт судов Управленческие расходы Страховые взносы Прочие прямые расходы	Рацион бесплатного питания Связь Навигационные материалы

Метод «директ-костинг» может с успехом использоваться менеджментом судоходных компаний для проведения маржинального анализа (анализа безубыточности), а также в процессе бюджетирования.

Маржинальный анализ позволяет судоходной компании определить допустимый уровень постоянных затрат, необходимый объем перевозок для получения желаемой величины прибыли, безубыточный объем перевозок (порог рентабельности), оптимальную структуру перевозок. Выбор вариантов загрузки флота, оценка эффективности принятия дополнительного заказа на перевозку, установление доходных ставок на новые перевозки также осуществляются на базе маржинального анализа [9].

В статье автора [10] обосновывается использование системы развитого директ-костинга при разработке бюджета доходов и расходов судоходной компании, что значительно расширяет возможности бюджета как учетно-аналитического обеспечения принятия управленческих решений. Для использования данной возможности рекомендуем предприятиям отрасли использовать вторую разновидность этого метода — развитой директ-костинг.

Представленная в табл. 3 классификация затрат позволяет сделать вывод о тождественности в отрасли прямых затрат переменным, а накладных — постоянным. Это является предпосылкой успешного применения в управленческом учете метода директ-костинг в сочетании с позаказным методом учета затрат. Например, для определения порога рентабельности необходимо рассчитать фактическую стоимость конкретного рейса, исходя из переменных затрат (сочетание позаказного метода и метода «директ-костинг»).

Таким образом, особого внимания и более широкого применения на предприятиях отрасли заслуживает, по моему мнению, система «директ-костинг». Она позволяет решать не только традиционные задачи калькулирования, но и представляет данные для: разработки инвестиционной и инновационной программы; решения вопросов установления и регулирования тарифов на перевозки; оптимизации структуры осуществляемых перевозок по критерию максимума маржинального дохода; принятия решений о получении дополнительного заказа на перевозку и т. д. А использование рекомендаций автора по применению развитого директ-костинга в ОБВТ расширяет возможности бюджетирования и бюджетного анализа для принятия управленческих решений менеджментом судоходных компаний.

«Стандарт-кост» — это метод учета нормативных затрат. Фактическое калькулирование осуществляется по фактическим затратам. Различают также смешанное калькулирование, при котором прямые расходы относятся на себестоимость в фактических суммах, а косвенные расходы — по нормативу (на основе планового коэффициента распределения).

Важнейшими для калькуляционного управленческого учета являются методы калькулирования по калькуляционным объектам [3], [11] – [13].

Главным условием применения позаказного метода является возможность выполнять изготовление уникального изделия или небольшой партии изделий. В результате формируется индивидуальная себестоимость единицы изделия. Прямые затраты при позаказном методе учи-

тываются по статьям калькуляции в разрезе отдельных производственных заказов. Косвенные затраты (общепроизводственные и общехозяйственные) учитываются по местам их возникновения и включаются в себестоимость отдельных заказов в соответствии с установленной базой распределения. Отдельный производственный заказ является объектом учета затрат и объектом калькулирования при этом методе. Позаказный метод широко используется в финансовом учете на промышленных предприятиях отрасли: на судостроительных, судоремонтных предприятиях. Заказ открывается на каждое судно (строящееся или подлежащее ремонту). В эксплуатационной деятельности водного транспорта данный метод широко применяется только в управленческом учете (например, при определении фактической себестоимости конкретной перевозки).

В отраслях промышленности с серийным и поточным производством применяется поперечный метод калькулирования. Он используется, когда изделия в определенной последовательности проходят несколько этапов производства, называемых переделами. При этом методе прямые затраты отражаются в текущем учете не по видам продукции, а по переделам, которые и являются объектом учета затрат. Каждый передел завершается получением готового полуфабриката, который может быть либо реализован, либо отправлен в следующий передел. Элементы данного метода применяются в ОБВТ, занимающихся производством нерудных строительных материалов (песок, гравий, щебень, песчано-гравийная смесь). Затраты по этим видам продукции учитываются последовательно по всем элементам технологического процесса: разведка, вскрышные работы, добыча, обогащение (промывка, сортировка, прочие), погрузка в суда.

Попроцессный метод калькулирования (простой) имеет следующие особенности: ограниченное количество объектов калькулирования (один-два), позволяющее обобщать затраты по процессам и относить их на конкретный вид продукции; отсутствие незавершенного производства. Именно этот метод применяется в финансовом учете ОБВТ для калькулирования себестоимости перевозок в соответствии с отраслевыми стандартами. Продукция транспорта носит массовый характер, не имеет остатков незавершенного производства, поэтому исчисление себестоимости перевозок не требует применения сложных методов. Бухгалтерский учет затрат по перевозкам в судоходных компаниях ведется на 20 счете в целом по транспортному процессу, без разделения по этапам процесса перевозки (начально-конечные операции, движенческая операция). Поэтому данный метод в отрасли получил название однопроцессный метод, или метод простого одноступенчатого калькулирования.

Таким образом, в реальной практике ОБВТ в зависимости от стоящих перед менеджментом целей могут применяться разные методы учета затрат и калькулирования себестоимости. В некоторых случаях могут применяться комбинации нескольких методов. Считаем, что основная задача калькулирования заключается в том, чтобы умело используя рассмотренные в данной статье методы, исчислять разные виды себестоимости перевозок (полная, неполная; фактическая, нормативная и т. д.), реализуя важнейшее правило управленческого учета, сформулированное Ч. Т. Хорнгреном и Дж. Фостером: «Разные затраты — для разных целей».

Выводы

При формировании системы управленческого учета в организациях отрасли необходимо учитывать возрастающие требования менеджмента судоходных компаний к информации о затратах. Поэтому особое значение приобретает создание в учетно-аналитическом контуре судоходных компаний современных систем учета и калькулирования себестоимости, которые позволят получать системную информацию о затратах и результатах как по перевозочному процессу в целом, так и по конкретному рейсу.

Автор разделяет позицию многих экономистов [3], [5] – [8] об использовании в управленческом учете систем калькулирования смешанного типа, в которых используются принципы калькуляции затрат, позволяющие получать разнообразную информацию для принятия как оперативных, так и стратегических решений.

Основные научные результаты проведенного автором исследования заключаются в следующем.

1. С учетом особенностей судоходного бизнеса, автором обосновывается использование в управленческом учете интеграции позаказного метода и метода директ-костинг. Это значительно расширяет информационные и управленческие возможности учета.

2. Для применения в отрасли метода директ-костинг автором с использованием корреляционно-регрессионного анализа произведена классификация эксплуатационных затрат на постоянные и переменные.

3. Предложена авторская отраслевая структура отчета о финансовых результатах при использовании ОБВТ простого директ-костинга.

4. Для расширения возможностей бюджетирования и бюджетного анализа обосновывается применение в отрасли развитого директ-костинга.

5. Использование в практической деятельности полученных результатов, направленных на совершенствование систем калькулирования в отрасли, позволит повысить оперативность и аналитичность информации, ориентированной на принятие управленческих решений менеджментом судоходных компаний в настоящем и будущем.

Список литературы

1. Волынчиков И. Б. Исследование основных проблем развития морского транспорта России / И. Б. Волынчиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 159–167.
2. Центральная база статистических данных. [Электронный ресурс] — URL: <http://www.gks.ru/dbscripts/cbsd/DBI.net.cgi#1> (дата обращения: 24.02.2015).
3. Вахрушева О. Б. Управленческий учет в современных условиях развития: монография / О. Б. Вахрушева. — Одинцово: Одинц. гуман. ин-т, 2010.
4. Ермакова Н. А. Бюджетирование в системе управленческого учета / Н. А. Ермакова. — М.: Экономика, 2004. — 187 с.
5. Карпова Т. П. Традиционные и современные системы калькулирования как инструментарий управления затратами / Т. П. Карпова // Международный научно-практический журнал «Экономика, бизнес, банки». — 2013. — № 3. — С. 88–102.
6. Кондраков Н. П. Бухгалтерский учет в бюджетных организациях: монография / Н. П. Кондраков, И. Н. Кондраков. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Проспект, 2002. — 228 с.
7. Ивашкевич В. Б. Развитие управленческого учета и анализа в условиях кризисного состояния экономики предприятия: монография / В. Б. Ивашкевич. — Казань: Изд. КГУ, 2014. — 220 с.
8. Врублевский Н. Д. Управленческий учет издержек производства: теория и практика / Н. Д. Врублевский. — М.: Финансы и статистика, 2002.
9. Крайнова В. В. Управленческий учет затрат в организациях внутреннего водного транспорта: монография / В. В. Крайнова. — Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. — 203 с.
10. Крайнова В. В. Формирование бюджета доходов и расходов судоходной компании / В. В. Крайнова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2014. — № 4. — С. 6–9.
11. Каверина О. Д. Управленческий учет: системы, методы, процедуры: монография / О. Д. Каверина. — М.: Финансы и статистика, 2003. — 352 с.
12. Николаева О. Е. Стратегический управленческий учет: монография / О. Е. Николаева, О. В. Алексеева. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 304 с.
13. Крайнова В. В. Управление бухгалтерскими и налоговыми затратами по содержанию флота в организациях внутреннего водного транспорта / В. В. Крайнова // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 1 (66). — С. 62–67.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ КОНКУРЕНТНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ПОРТОВ

PORTS COMPETITIVE ADVANTAGES CLASSIFICATION AND DEVELOPMENT

Успешная реализация «Стратегии развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года» предполагает развитие теоретических и методических основ в области формирования и реализации конкурентных стратегий порта, основанных на классификации преимуществ. В статье предложена формулировка понятия «конкурентные преимущества портов» и выполнена их классификация с учетом адаптации общепринятых признаков к специфическим условиям функционирования портов. В качестве признака классификации выбрано условие, определяющее характер источника преимущества.

Формирование набора преимуществ начинается с выбора вида стратегии на основе понимания того, чего хотят клиенты, и позиции порта на рынке. Оценка конкурентных преимуществ портов с точки зрения субъектов их формирования, периода действия и устойчивости преимущества позволяет выделить те из них, которые могут формироваться на уровне собственников и менеджеров портов. Дальнейшее распределение преимуществ по видам конкурентных стратегий позволяет определить набор преимуществ, присущих каждому виду стратегии, а также выявить общие для всех видов стратегий портов преимущества: основанные на уровне технического и технологического развития и основанные на высоком уровне организации бизнес-процессов.

The successful release of the «Russian seaport infrastructure development strategy till the year of 2030» implies the development of theoretical and methodical basis in the field of setting and releasing port competitive strategies based on the advantages classification. There is given a definition of the notion «port competitive advantages» in the article, as well as their classification taking into consideration the adapted common features to peculiar port functioning conditions. The condition determining the nature of advantage source is chosen as a classification feature.

The advantages set development begins with the choice of the strategy type on the basis of the clients demand understanding and the port market position. Port competitive advantages assessment from the point of the subjects of their development and from the point of advantage duration and sustainability provides the opportunity to identify those ones which will be developed at the level of port owners and top managers. Further advantages sorting on competitive strategies types allows to identify advantages set which is peculiar of each strategy type, as well as to find the advantages common of all port strategies types: the ones based on technical and technological development and the ones based on a high level of business processes organization.

Ключевые слова: порт, конкурентные преимущества, классификация, конкурентная стратегия.
Key words: port, competitive advantages, classification, competitive strategy.

Введение

Исследование вопросов конкурентных преимуществ и конкурентных стратегий привлекает сегодня многих специалистов по проблемам управления. Эта необходимость диктуется жесткой конкурентной борьбой, существующей во многих областях народного хозяйства. Каждый бизнес-процесс компании сегодня должен носить осознанный характер, однако, отсутствие систематизированных знаний о конкуренции, методах и способах формирования и управления преимуществами, делают компании уязвимыми [1]. Особенно это касается компаний специфической сферы деятельности, к которым можно отнести порты [2].

Развитие портовой отрасли России на протяжении ближайших 15 лет будет происходить в соответствии со «Стратегией развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года» [1]. Успешная реализация «Стратегии» предполагает развитие теоретических и методических ос-

нов в области формирования и реализации конкурентных стратегий порта, основанных на классификации преимуществ [1], [3] – [5].

Классификация конкурентных преимуществ портов

Прежде, чем приступить к классификации конкурентных преимуществ портов, необходимо сформулировать понятие «конкурентных преимуществ портов». Несмотря на частое использование в печати и в стратегиях развития портов данного понятия на сегодняшний день в специальной литературе не найти его формулировки или определения, равно как и классификации конкурентных преимуществ портов.

Используя распространенные формулировки этого термина для предприятия или фирмы, можно определить конкурентные преимущества порта как совокупность реальных превосходств одного порта над другими в экономическом, техническом, технологическом и организационном аспектах. Следует отметить, что превосходства должны быть именно реальными — действующими и осязаемыми, а не потенциально возможными [4], [5].

Проведем классификацию конкурентных преимуществ портов [6] – [9] с использованием методических подходов, предложенных одним из ведущих специалистов в России в области конкурентоспособности Г. Л. Азоевым, выбрав в качестве признака классификации условие, определяющее характер источника преимущества.

1. Преимущества, основанные на экономических факторах:

- общеэкономическое состояние рынка, тяготеющего к порту;
- факторы, стимулирующие спрос на услуги порта — большая емкость рынка, отсутствие альтернатив услугам порта;
- эффект масштаба и эффект опыта. Крупный порт или транспортный узел имеет, как правило, более низкие удельные затраты. Это проявляется, в большей степени, из-за установившихся и повсеместно внедренных технологий и, как следствие, технологического превосходства, а также в оптимальной загрузке оборудования и использовании ресурсов;
- доступность кредитования по низким ставкам, а также способность эффективного использования источников финансирования;
- доступность развитого рекламного пространства.

2. Преимущества, основанные на нормативно-правовом регулировании деятельности портов:

- стимулирующая политика государства в отношении портовой зоны (например, создание портовой особой экономической зоны (ПООЗ) «Мурманск» в соответствии с Постановлением Правительства РФ №800 от 12.10.2010 г.) или региона, в котором находится порт, и, как следствие, налоговые и таможенные преференции, инвестиции;
- неприменение ценового регулирования в отношении отдельных морских портов (например, портов РФ Балтийского бассейна).

3. Конкурентные преимущества портов структурного характера:

- вертикальная интеграция, когда в составе группы компаний существует производитель или потребитель продукции/сырья, проходящих через порт, логистические компании или перевозчик от/до порта (например, Группа НЛМК и UCL Holding, ОАО «ОХК «УРАЛХИМ» и Riga Fertilizer Terminal);
- горизонтальная интеграция — объединение компаний, занимающихся портовыми услугами (например, Группа «Сумма», GLOBAL PORTS).

4. Преимущества, основанные на административных ограничителях деятельности:

- наличие необходимой лицензии (например, на перевалку опасных грузов);
- наличие регламентирующих документов для проведения обработки груза на рейде.

5. Преимущества, связанные с уровнем развития инфраструктуры, тяготеющей к порту:

- наличие примыкающей к порту развитой инфраструктуры — гидротехнических сооружений, транспорта, связи, энергетики;

– наличие профильных образовательных учреждений, рынка профессиональных работников;

– наличие в регионе развитой сети сервиса для перегрузочного оборудования порта.

6. Преимущества, основанные на уровне технического (технологического) развития:

– наличие современного подъемно-транспортного оборудования (ПТО);

– внедренные технологии, позволяющие полноценно использовать современные ПТО;

– наличие развитых инженерных сетей в порту.

7. Преимущества, основанные на высоком уровне организации бизнес-процессов:

– информационная поддержка бизнес-процессов;

– высокая организация бизнес-процессов (например, в соответствии с принципами «бережливого производства», «шесть сигм»).

8. Преимущества, основанные на географическом и климатическом расположении:

– непосредственная близость к рынкам производства/потребления грузов, переваливаемых через порт;

– естественные глубины и незамерзающие подходы к порту;

– близость или нахождение в международных транспортных коридорах.

9. Конкурентные преимущества портов неправового характера:

– достигаемые в результате недобросовестной конкуренции;

– достигаемые в результате недобросовестного выполнения представителями органов власти своих обязанностей (бюрократизм, коррупция, наличие неформальных отношений);

– криминальные действия (контрабанда, контроль процессов криминальными структурами).

Формирование конкурентных преимуществ портов. Выбор вида конкурентной стратегии порта. Проведенная классификация позволяет обобщить некий набор превосходств одного порта над конкурентами, благодаря которому услуга порта может стать конкурентоспособной. Но для того чтобы собственники или менеджмент порта мог рассчитывать на прибыль в отрасли [3] – [6], необходимо ответить на следующие вопросы:

– кто клиенты порта, чего они хотят?

– что собой представляет порт на данном этапе, что он должен сделать для выживания в конкурентной борьбе?

Ответы на эти вопросы позволяют выбрать вид стратегии.

Для сохранения или усиления конкурентоспособности портов, как и для многих других сфер бизнеса, можно выделить следующие виды стратегий:

– стратегия снижения издержек порта;

– стратегия дифференциации качества услуг порта;

– стратегия фокусирования на определенных клиентах или грузах.

Стратегия снижения издержек порта [3], [4] направлена на снижение себестоимости оказываемых портом услуг. Это стратегия внутренней операционной эффективности, которая позволяет порту без увеличения грузооборота получать большие прибыли.

Успешно реализованная стратегия снижения издержек (лидерства по издержкам) позволяет обеспечить порту защиту от всех конкурентных сил модели Портера:

– от «Конкурентов» — поскольку порт может получать хоть минимальную, но прибыль, когда порты-конкуренты несут убытки;

– от «новых портов» — ввиду высокого барьера входа в услугу;

– от способности «потребителя» портовых услуг торговаться — так как у него отсутствует более дешевая альтернатива;

– от «поставщиков» — поскольку снижение издержек ведет к снижению в абсолютном отношении потребности в услугах «Поставщиков»;

– от «заменителей» услуг порта — ввиду появления дополнительных возможностей по снижению цен на свои услуги в борьбе с «Заменителями».

Если порт выбирает стратегию дифференциации качества своих услуг [3], [4], [6], [7], это означает способность порта обеспечить уникальность и более высокую ценность услуг порта, нежели порты-конкуренты. Наиболее эффективно иметь дифференциацию по нескольким критериям: по используемой технологии перевалки груза, по качеству обработки груза, по скорости обработки и пр. Такая стратегия позволяет получать большую прибыль по сравнению с портами-конкурентами ввиду появления высокого уровня лояльности со стороны клиентов.

Сосредоточение усилий порта на удовлетворении потребностей в грузоперевалке определенной группы клиентов или перевалке определенного сегмента грузов позволяет говорить о стратегии фокусирования. Такие порты стремятся «заточить» себя под конкретных клиентов, не стремясь конкурировать за подобный груз другого клиента [3], [4].

Очень редко порты определяют для себя исключительно одну конкурентную стратегию из трех перечисленных, но чаще всего существует превалирование одного из видов [3], [4].

Оценка конкурентных преимуществ портов с точки зрения субъектов их формирования, периода действия и устойчивости. Каждый вид конкурентной стратегии требует формирования определенного набора преимуществ. Определим, какие из них присущи каждому из описанных видов стратегии.

Прежде всего, необходимо принять во внимание, что эффективное формирование конкурентных преимуществ порта возможно силами наиболее заинтересованных сторон — собственников и менеджмента порта, т. е. тех, кто формулирует для себя стратегию и формирует определенный набор преимуществ для реализации этой стратегии [3], [10]. Проведем оценку конкурентных преимуществ указанной классификации с целью распределения их по субъектам формирования и длительности действия (табл. 1).

Таблица 1

**Субъекты формирования конкурентных преимуществ,
период действия и устойчивости**

№ п/п.	Конкурентные преимущества	Субъекты формирования	Период действия, устойчивости конкурентного преимущества
1	Основанные на экономических факторах	Государство Конъюнктура рынка	Длительный
2	Основанные на нормативно-правовых актах	Государство	Неопределенный (в основном длительный, но может внезапно прекратиться)
3	Структурного характера	Крупные собственники	Длительный
4	Основанные на административных ограничителях деятельности	Государство Собственник Менеджмент порта	На период действия лицензии (в основном среднесрочный)
5	Связанные с уровнем развития инфраструктуры, тяготеющей к порту	Государство Собственник Менеджмент порта Бизнес-структуры	Длительный
6	Основанные на уровне технического и технологического развития	Собственник Менеджмент порта	Длительный и среднесрочный
7	Основанные на высоком уровне организации бизнес-процессов	Менеджмент порта	Длительный
8	Основанные на географическом и климатическом расположении	Естественно-сформированные	Постоянное
9	Неправового характера	Формируются стохастически	Неопределенный

Поскольку при формировании стратегии уже существующего порта собственник порта или его менеджмент не может в той или иной мере влиять на формируемые государством, конъюнктурой рынка и естественным путем конкурентные преимущества [1], [3], [6] – [8], [10], то остановимся на формировании следующих конкурентных преимуществ:

- структурного характера;
- основанных на административных ограничителях деятельности;
- связанных с уровнем развития инфраструктуры, тяготеющей к порту;
- основанных на уровне технического и технологического развития;
- основанных на высоком уровне организации бизнес-процессов.

Таблица 2

Распределение конкурентных преимуществ по видам стратегии

№ п/п.	Стратегия снижения издержек порта	Дифференциация качества услуг порта	Фокусирование на определенных клиентах или грузах
1	Структурного характера (вертикальная интеграция, горизонтальная интеграция)	Основанные на административных ограничителях деятельности	Основанные на уровне технического и технологического развития
2	Связанные с уровнем развития инфраструктуры, тяготеющей к порту	Связанные с уровнем развития инфраструктуры, тяготеющей к порту	Основанные на высоком уровне организации бизнес-процессов
3	Основанные на уровне технического и технологического развития	Основанные на уровне технического и технологического развития	–
4	Основанные на высоком уровне организации бизнес-процессов	Основанные на высоком уровне организации бизнес-процессов	–

Распределение конкурентных преимуществ по видам конкурентных стратегий портов.

Распределим полученный из сделанной оценки набор конкурентных преимуществ между видами конкурентных стратегий портов (табл. 2), откуда видно, что независимо от вида выбираемой стратегии, необходимыми составляющими набора конкурентных преимуществ для любой стратегии являются преимущества, основанные на уровне технического и технологического развития, и преимущества, основанные на высоком уровне организации бизнес-процессов.

По сути, в сложившейся сегодня в портовой отрасли России ситуации [1], [2], [6], [7], [10], независимо от того, какую стратегию реализует в своей компании собственник, наибольшего и длительного успеха достигают те порты, которые смогли своевременно и качественно модернизировать или обновить свое перегрузочное оборудование, перейти на современные технологические решения в грузоперевалке, интегрировать в деятельность порта специализированные информационные системы и организовать бизнес-процессы в компании на самом высоком уровне. Именно эти решения пока позволяют таким компаниям занимать лидирующие позиции в отрасли.

Выводы

Понимание того, что хотят видеть клиенты порта и на какой позиции находится порт на рынке, позволяет менеджерам и собственникам выбрать один из видов конкурентной стратегии:

- снижения издержек порта;
- дифференциации качества услуг порта;
- фокусирования на определенных клиентах или грузах.

Классификация конкурентных преимуществ по условию, определяющему характер источника преимущества, а также оценка посредством субъекта их формирования позволяют определить перечень преимуществ, которые возможно формировать на уровне собственников и менед-

жмента портов. Это преимущества структурного характера, основанные на административных ограничениях деятельности, связанные с уровнем развития инфраструктуры, тяготеющей к порту, основанные на уровне технического и технологического развития; основанные на высоком уровне организации бизнес-процессов, которые возможно формировать на уровне собственников и менеджмента портов.

Каждому виду конкурентной стратегии порта присущ определенный набор преимуществ (табл. 2).

Конкурентные преимущества, основанные на уровне технического и технологического развития и основанные на высоком уровне организации бизнес-процессов, являются общими для всех видов конкурентных стратегий портов и позволяют портам, сформировавшим эти преимущества, удерживать устойчивые лидирующие позиции в отрасли.

Список литературы

1. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: WWW.URL:<http://www.rosmorport.ru/seastrategy.html> (дата обращения: 22.02.2015).
2. Королева Е. А. Сущность качества транспортно-экспедиционного обслуживания / Е. А. Королева, Е. В. Филатова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 152–157.
3. Портер М. Конкурентная стратегия: методика анализа отраслей и конкурентов / М. Портер; пер. с англ. — 5-е изд. — М.: Альпина Пабlishер, 2015. — 453 с.
4. Магretta Дж. Ключевые идеи. Майкл Портер. Руководство по разработке стратегии / Дж. Магretta; пер. с англ. А. Калинина. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. — 272 с.
5. Теория и методология управления конкурентоспособностью бизнес-систем: монография / под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. С. А. Баронина и д-ра экон. наук, проф. Л. Н. Семерковой. — М.: ИНФРА-М, 2014. — 329 с.
6. Жусупов С. Д. Состояние и перспективы развития морских портов России / С. Д. Жусупов // Транспорт Российской Федерации. — 2011. — Вып. № 6(37). — С. 36–39.
7. Степанов А. Л. Эволюция портов и экспедиторской деятельности — основа транспортной логистики / А. Л. Степанов // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 4 (50). — С. 6–9.
8. Фатхутдинов Р. В. Глобальная конкурентоспособность. На стол современному руководителю / Р. В. Фатхутдинов. — М.: РИА «Стандарты и качество», 2009. — 464 с.
9. Томпстон С. Р. Российская внешняя торговля XIX – XX в.: организация и финансирование / С. Р. Томпстон; пер. с англ. Ю. А. Петрова. — М.: Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 2008. — 471 с.
10. Материалы II ежегодной конференции «Техника и технологии для портов: эффективные инвестиции» 3 октября 2014 г. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: WWW.URL:<http://morvesti.ru/spec/detail.php?ID=29708> (дата обращения: 24.02.2015).

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.3.001.57:629.12.06

А. В. Григорьев,
канд. техн. наук, доц.;

Е.А. Глеклер,
соиск.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕДИНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ SIMULINK

COMPUTER SIMULATION AND RESEARCH OF THE INTEGRATED ELECTRIC POWER SYSTEM IN SIMULINK

При проектировании электроэнергетических систем (ЭЭС) для расчета статических и переходных характеристик широкое применение находит компьютерное моделирование. На компьютерных моделях ЭЭС путем проведения вычислительных экспериментов рассчитывают качество электрической энергии в судовой сети, токи короткого замыкания, провалы напряжения и др. Широкое применение для моделирования ЭЭС нашел пакет MatLab с приложением Simulink. В статье рассмотрена математическая и компьютерная модель синхронного генератора в среде Simulink. Показано строгое соответствие компьютерной и математической модели. Создана и представлена компьютерная модель ЭЭС реального судна, на которой проведены экспериментальные исследования переходных процессов в различных режимах эксплуатации. Сравнительный анализ вычислительного эксперимента и экспериментальных исследований на реальном объекте показали высокую сходимость результатов. Разработанную компьютерную модель можно использовать для моделирования ЭЭС различных судов.

Investigation of properties of object, calculation of its static and transitional characteristic are necessary during designing of electric power systems. Required research can be made on computer model by providing of computing experiments. MatLab with Simulink extension has gotten wide application for modeling of electric power systems. Mathematic and computer models of synchronous generator in Simulink are considered in the article. Strict accordance of computer and mathematic models is shown. Authors have made and have presented in the article computer model of power electric system of real ship. Research of transitional processes in different operation modes are made on the computer model. Comparative analysis of computing experiment and experimental research on real object has shown high degree of convergence of results. Developed computer model can be used for modeling of electric power systems of different ships.

Ключевые слова: математическая модель, компьютерная модель, экспериментальные исследования, вычислительный эксперимент, синхронный генератор, полупроводниковый преобразователь, электроэнергетическая система, судно.

Key words: mathematic model, computer model, experimental research, computing experiment, synchronous generator, semiconductor converter, electric power system, ship.



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ системы (ЭЭС) находят широкое применение в различных областях народного хозяйства, включая морской транспорт. Основным назначением ЭЭС является производство электроэнергии необходимого количества и требуемого качества с целью реализации автономным объектом своих эксплуатационных характеристик. На этапе проектирования ЭЭС необходимо изучить свойства системы, определить её статическую и динамическую устойчивость, качество электроэнергии в сети, рассчитать переходные процессы. Это позволит принять обоснованные конструкторские решения по выбору структуры, составу и алгоритму управления ЭЭС.

При проектировании и исследовании сложных ЭЭС в настоящее время широко используется компьютерное моделирование. Применение современных пакетов научного программного обеспечения позволяет существенно упростить задачу создания компьютерной модели ЭЭС. Некоторые современные пакеты, среди которых можно отметить *MatLab* с приложением *Simulink*, имеют сравнительно большую библиотеку стандартных технических устройств и виртуальных электроизмерительных приборов, необходимых для проведения вычислительных экспериментов, однако их полное математическое описание в отечественной литературе, чаще всего отсутствует, что может поставить под сомнение результаты экспериментальных исследований [1] – [3]. В связи с этим были рассмотрены математические модели основных блоков библиотеки *SimPowerSystems*, используемых для моделирования ЭЭС, и их компьютерная реализация. В качестве примера приведена математическая и компьютерная модель синхронного генератора, широко используемого в составе ЭЭС в качестве источника электроэнергии.

Классическая схема эквивалентной синхронной машины во вращающейся системе координат d - q и схема замещения приведены на рис. 1. Здесь и далее в статье на схемах и в математических выражениях приводятся общепринятые в электротехнике условные обозначения без их расшифровки.

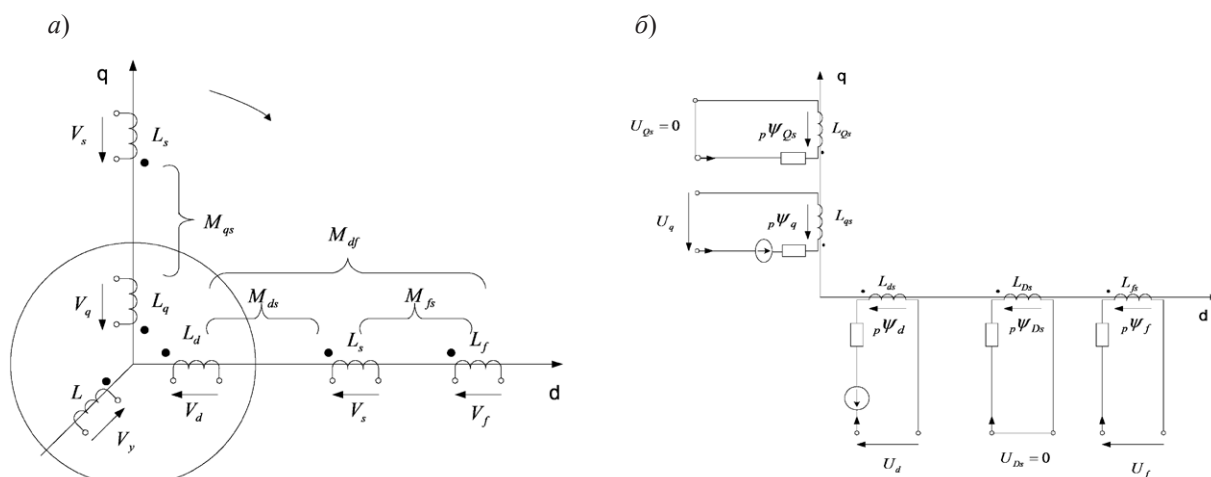


Рис. 1. Эквивалентная схема (а) и схема замещения (б) синхронной машины

Схема замещения синхронной машины, используемая при создании математической модели в среде *Simulink*, приведена на рис. 2. Она отличается от принятой большинством авторов в отечественной литературе. В частности, в схему замещения введена вторая демпферная обмотка с индуктивностью L_{lkq2}' , используемая для учета неявнополюсности ротора синхронной машины [4] – [17].

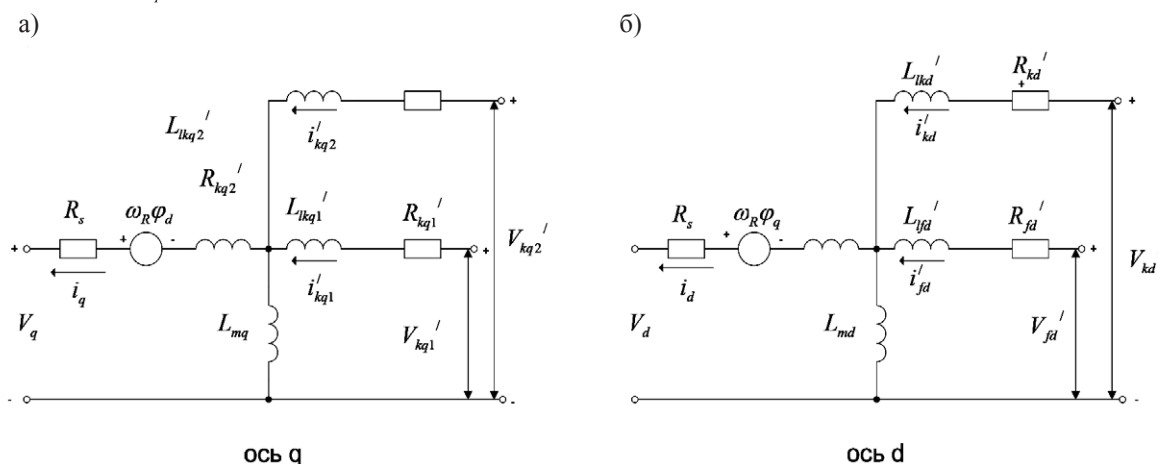


Рис. 2. Схема замещения синхронной машины в среде *Simulink*:
а — по продольной оси q ; б — по продольной оси d

Математическая модель синхронного генератора, реализованная в среде *Simulink*, состоит из системы дифференциальных уравнений для напряжений и системы алгебраических уравнений для расчета потокоцеплений, представленных далее.

Проведенный сравнительный анализ показывает, что математическая модель синхронной машины, реализованная в среде *Simulink* (библиотека приложения *SimPowerSystem*), является классической моделью синхронной машины с демпферной обмоткой [8], [9]:

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot i_d + \frac{d}{dt} \Phi_d - \omega_R \cdot \Phi_q; \\ V_q = R_s \cdot i_q + \frac{d}{dt} \Phi_q + \omega_R \cdot \Phi_d; \\ V'_{fd} = R'_{fd} \cdot i'_{fd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{fd}; \\ V'_{kd} = R'_{kd} \cdot i'_{kd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kd}; \\ V'_{kq1} = R'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kq1}; \\ V'_{kq2} = R'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kq2}; \end{cases} \quad \begin{cases} \Phi_d = L_d \cdot i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}); \\ \Phi_q = L_q \cdot i_q + L_{mq} \cdot i'_{kq}; \\ \Phi'_{fd} = L'_{fd} \cdot i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}); \\ \Phi'_{kd} = L'_{kd} \cdot i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd}); \\ \Phi'_{kq1} = L'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + L_{mq} \cdot i_q; \\ \Phi'_{kq2} = L'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + L_{mq} \cdot i_q. \end{cases}$$

Компьютерная модель синхронной машины, реализованная в среде *Simulink*, приведена на рис. 3. В блоках компьютерной модели помещены подсистемы для расчета уравнений математической модели синхронной машины.

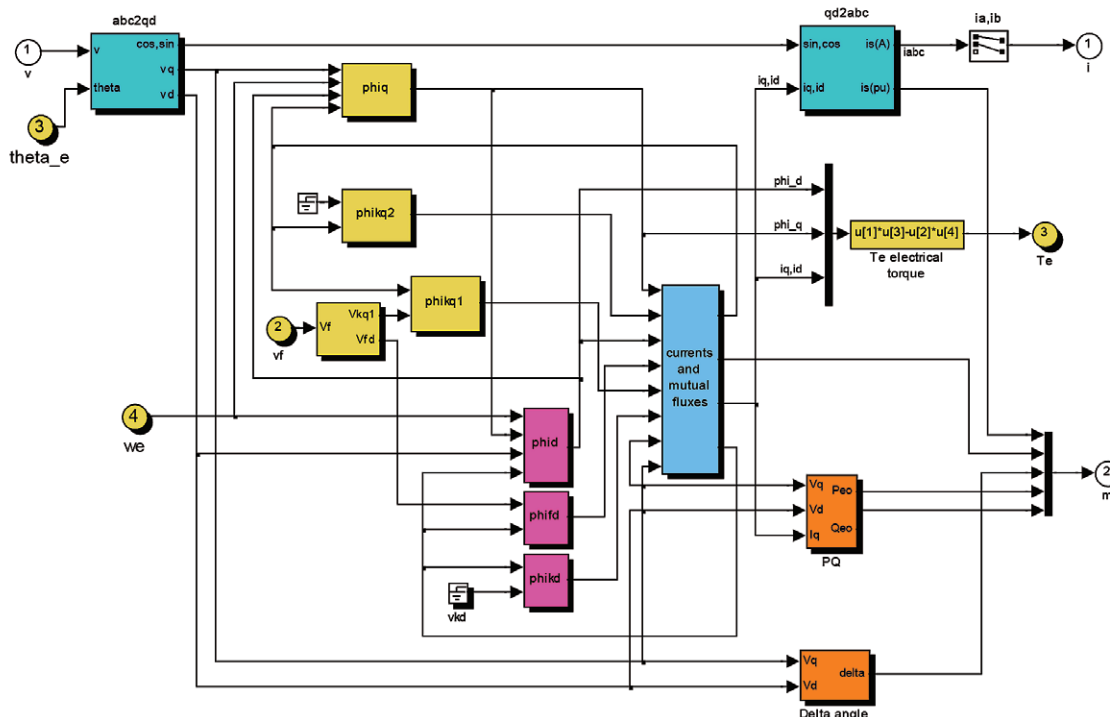


Рис. 3. Компьютерная модель синхронной машины в среде *Simulink*

В ряде случаев в библиотеке пакета *Simulink* отсутствуют модели требуемых электротехнических устройств, в частности, нет модели шестифазной синхронной машины. Для создания компьютерных моделей отсутствующих электротехнических устройств могут использоваться стандартные модели, представленные в библиотеке пакета *Simulink* [10], [11].

Проведенный авторами анализ подтверждает, что компьютерные модели электротехнических устройств, представленных в библиотеке приложения *SimPowerSystem*, имеют строгое математическое описание и адекватно описывают объекты.

На рис. 4 приведена структурная схема реальной судовой ЭЭС, взятая в основу для создания компьютерной модели объекта [12], [13]. В состав ЭЭС входят два главных, стояночный и аварийный дизель-генераторные агрегаты (ГДГ1, ГДГ2; СДГ; АДГ), полупроводниковые преобразователи частоты со звеном постоянного тока (ППЧ1, ППЧ2), асинхронные гребные электродвигатели (ГЭД1, ГЭД2), подруливающее устройство (ПУ), главный и аварийный распределительный щит (ГРЩ, АРЩ), винторулевые колонки (ВРК1, ВРК2), трехобмоточные повышающие трансформаторы (Тр1, Тр2).

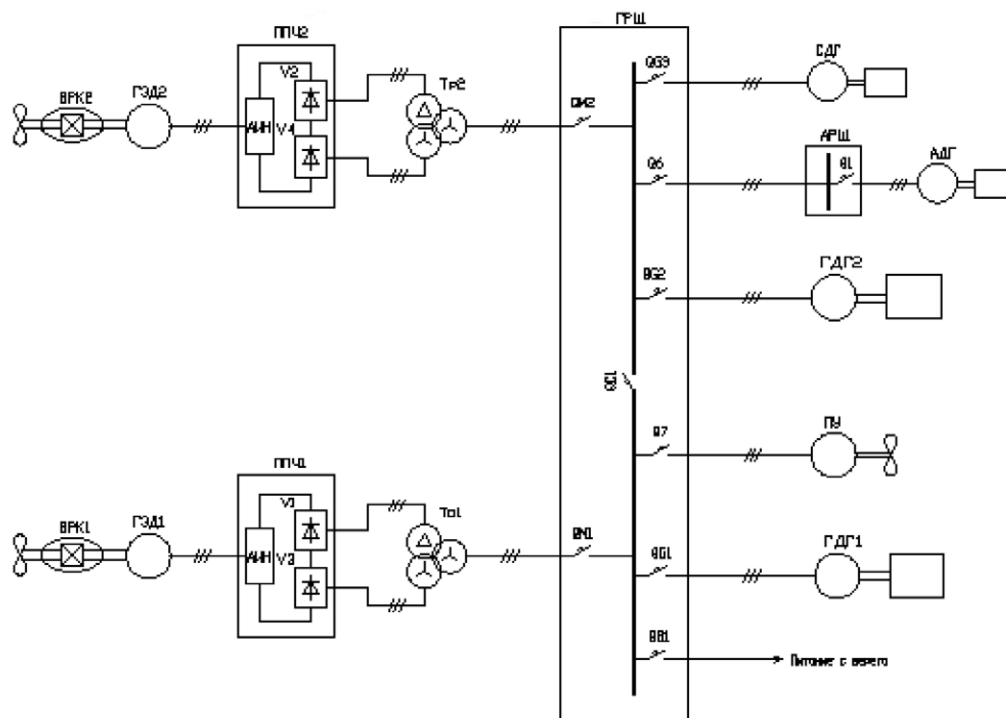


Рис. 4. Судовая электроэнергетическая система

На рис. 5 приведена разработанная авторами компьютерная модель ЭЭС, собранная в среде *Simulink* с применением стандартных блоков библиотеки *SimPowerSystems* [14], [15].

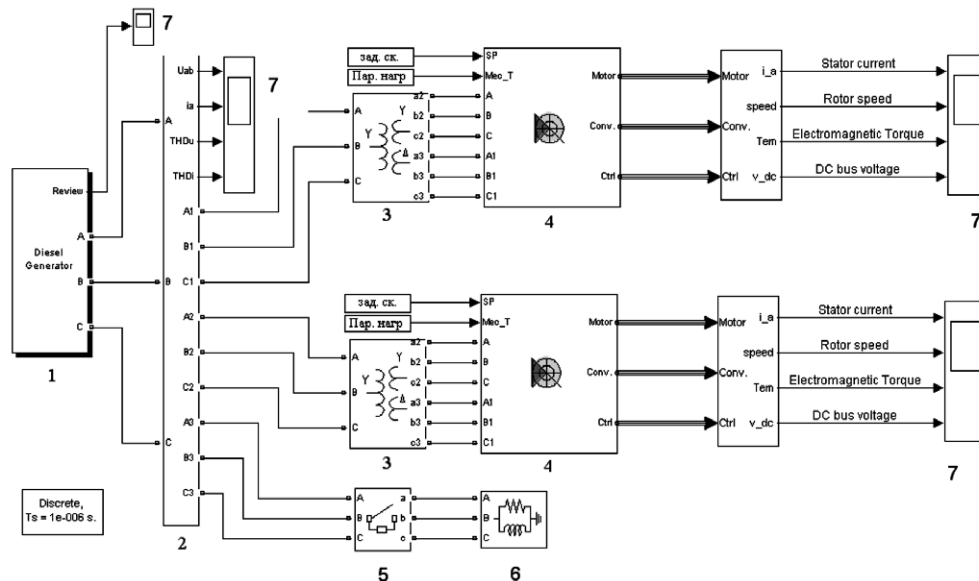


Рис. 5. Компьютерная модель судовой электроэнергетической системы:

1 — дизель-генератор; 2 — ГРЩ; 3 — трансформатор; 4 — гребной электропривод; 5 — автоматический выключатель; 6 — статическая нагрузка; 7 — виртуальные электроизмерительные приборы

Компьютерная модель ЭЭС создана с использованием стандартных блоков библиотеки *SimPowerSystems*, путем добавления собственных моделей на базе стандартных блоков пакета. Модель ЭЭС разработана с целью исследования динамических режимов системы и влияния полупроводниковых преобразователей на качество электроэнергии в судовой сети.

На рис. 6 приведены переходные процессы пуска и остановки гребного электродвигателя (ГЭД), полученные в результате проведения вычислительных экспериментов на компьютерной модели ЭЭС.

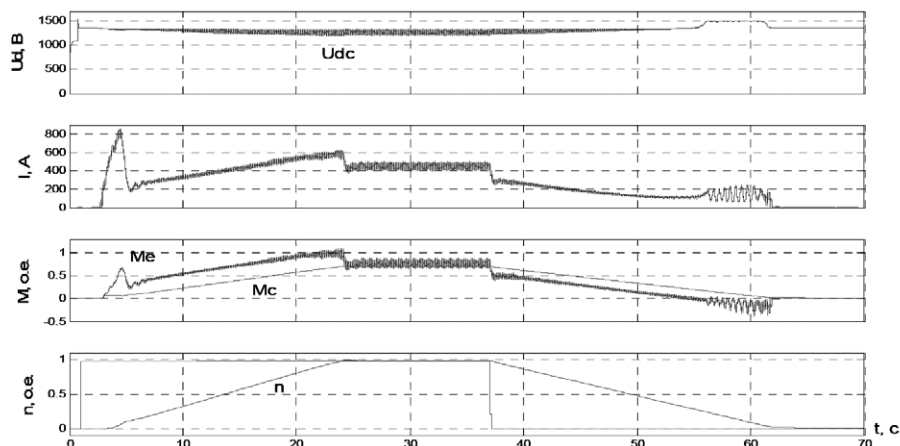


Рис. 6. Переходные процессы пуска и остановки ГЭД:

U_d — напряжение в звене постоянного тока ПП; I , M_e , n — ток, момент и частота вращения ГЭД

На компьютерной модели судовой ЭЭС были рассчитаны мгновенные значения напряжений и токов в судовой сети для разных режимов эксплуатации и проведен их гармонический анализ (рис. 7).

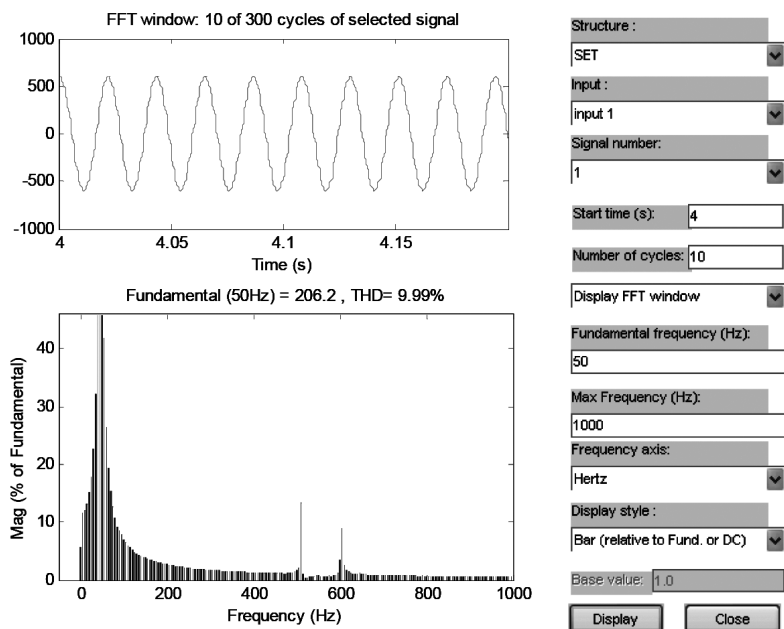


Рис. 7. Мгновенное значение и спектр высших гармоник напряжения судовой сети ЭЭС

Результаты проведенных компьютерных экспериментов показали, что во всех режимах эксплуатации качество электроэнергии в судовой сети для конкретного объекта не превышает допустимых значений. Полученные на компьютерной модели результаты были подтверждены в ходе ходовых испытаний реальной судовой ЭЭС малого гидрографического судна «Вайгач». Сравнение результатов экспериментальных исследований, полученных на компьютерной модели ЭЭС и реальном объекте, показали хорошую сходимость [16], [17].

Таким образом, проведенный научный анализ подтверждает, что компьютерные модели электротехнических устройств, представленных в библиотеке блока *SimPowerSystems*, имеют строгое математическое описание и данный пакет целесообразно использовать при создании компьютерных моделей судовых ЭЭС.

Список литературы

1. Баранов А. П. Применение математического моделирования для исследования переходных процессов в судовых электроэнергетических системах / А. П. Баранов, А. В. Григорьев, Г. А. Новоселов // Пятая межд. конф. и выставка по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех-2003»: материалы конф. (сб. докл.). — СПб.: Изд-во НИЦ «Моринтех», 2003. — С. 281–285.
2. Баранов А. П. Исследование переходных процессов в судовой электроэнергетической системе на математической модели / А. П. Баранов, А. В. Григорьев // Эксплуатация морского транспорта. — СПб.: Наука, 2003. — С. 268–280.
3. Петухов В. А. Анализ и оптимизация эксплуатационных режимов судовых дизель-генераторов / В. А. Петухов, А. П. Баранов, А. В. Григорьев // Эффективность работы энергетических установок и технических средств: межд. сб. науч. тр. — Калининград: Изд-во КГТУ, 2003. — С. 98–105.
4. Григорьев А. В. Компьютерное моделирование судовых электроэнергетических систем / А. В. Григорьев // Тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. «Компьютерное моделирование 2004». — Ч. 1. — СПб.: Нестор, 2004. — С. 177–183.
5. Григорьев А. В. Применение пакета MatLab при моделировании и исследовании электроэнергетических систем / А. В. Григорьев // Тр. 3-й межвуз. конф. по науч. программному обеспечению «Практика применения научного программного обеспечения в образовании и научных исследований». — СПб.: Нестор, 2005. — С. 42–47.
6. Григорьев А. В. Компьютерная модель судового дизель-генераторного агрегата / А. В. Григорьев // Эксплуатация морского транспорта: сб. науч. тр. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2006. — Вып. 45. — С. 294–302.
7. Григорьев А. В. Из опыта моделирования электроэнергетических систем в среде Simulink / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Тр. межвуз. конф. по науч. программному обеспечению «Практика применения научного программного обеспечения в образовании и исследованиях». — СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2007. — С. 79–82.
8. Григорьев А. В. Опыт применения пакета визуального моделирования Simulink при проектировании судовых электроэнергетических систем / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер, Д. И. Улитовский // Компьютерное моделирование 2008: тр. междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — С. 89–92.
9. Григорьев А. В. Единая электроэнергетическая установка гидрографического судна на базе системы электродвижения переменного тока / А. В. Григорьев, К. С. Ляпидов, Л. С. Макаров // Судостроение. — 2006. — № 4. — С. 33–34.
10. Григорьев А. В. Компьютерная модель единой электроэнергетической установки малого гидрографического судна / А. В. Григорьев, Д. И. Улитовский // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 1 (47). — С. 69–72.
11. Григорьев А. В. Экспериментальные исследования системы электродвижения переменного тока с полупроводниковым преобразователем / А. В. Григорьев // Судостроение. — 2007. — № 3. — С. 30–32.
12. Васин И. М. Малое гидрографическое судно «Вайгач» / И. М. Васин, А. В. Григорьев, Л. С. Макаров // Судостроение. — 2008. — № 1. — С. 31–32.
13. Григорьев А. В. Результаты ходовых испытаний единой электроэнергетической установки гидрографического судна «Вайгач» / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер, Д. И. Улитовский // Судостроение. — 2008. — № 1. — С. 33–35.
14. Григорьев А. В. Малое гидрографическое судно «Вайгач»: результаты ходовых испытаний / А. В. Григорьев // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2 (52). — С. 70–73.

15. Григорьев А. В. Результаты моделирования и испытания первой отечественной судовой единой электроэнергетической установки / А. В. Григорьев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2008. — № 2 (55). — С. 159–163.

16. Григорьев А. В. Опыт проектирования и результаты испытаний единой электроэнергетической установки судна «Вайгач» / А. В. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. — 2008. — № 4. — С. 28–31.

17. Григорьев А. В. Единая электроэнергетическая установка малого гидрографического судна «Вайгач»: опыт проектирования и результаты испытаний / А. В. Григорьев // Российский морской регистр судоходства: науч.-техн. сб. — 2008. — Вып. 31. — С. 271–278.

УДК 621.311:629.12

С. Ю. Труднев,
ст. преп.

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА И ТРЕХФАЗНОГО БЕЗЫНЕРЦИОННОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

DEVELOPMENT OF COMPUTER MODEL OF PARALLEL OPERATION OF THE GENERATING UNIT AND THREE-PHASE NON-INERTIAL POWER SUPPLY

В статье рассмотрены структура транспортировки электроэнергии, определены недостатки основных узлов, предложено техническое решение по устранению недостатков. Исследована работа устройства, позволяющего улучшить качество электрической энергии. Разработана математическая модель параллельной работы дизель-генераторного агрегата и безынерционного трехфазного источника питания, работающего через инвертор. На основании математической модели разработана и исследована имитационная модель предлагаемого устройства в программе MATLAB. Рассмотрена работа генераторного агрегата при динамическом возмущении, исследованы характеристики зависимости напряжения от времени работы. Выявлен положительный эффект параллельной работы трехфазного инвертора и генераторного агрегата. Доказана целесообразность применения безынерционных источников питания в системах электроснабжения. Сопоставлены результаты экспериментальных данных и основные требования Российского морского регистра судоходства, предъявляемые к электроэнергетическим системам судов.

In this article structure of transportation of the electric power is considered, shortcomings of the main knots are defined, the technical solution on elimination of shortcomings is proposed. Operation of the device allowing to improve quality of electric energy is investigated. The mathematical model of parallel operation of the diesel-generator unit and non-inertial three-phase power supply working via the inverter is developed. On the basis of mathematical model the imitating model of the offered device in the MATLAB program is developed and investigated. Operation of the generating unit at dynamic indignation is considered, characteristics of dependence of tension on operating time are investigated. The positive effect of parallel operation of the three-phase inverter and generating unit is revealed. Expediency of use of not inertial power supplies in systems of power supply is proved. Results of experimental data and the main requirements of the Sea Register imposed to electrical power systems of courts are compared.

Ключевые слова: параллельная работа, трехфазная сеть, модель, динамический режим, напряжение, дизель-генераторный агрегат.

Key words: parallel work, three-phase network, model, dynamic mode, tension, diesel-generator unit.



РЫБОЛОВНЫЙ флот Российской Федерации в течение двух последних десятилетий сильно устарел. Для решения данной проблемы правительство РФ разработало федеральную целевую программу по ежегодному обновлению флота в количестве до 20 еди-

ниц и списанию 17 единиц. На практике все происходит с точностью до наоборот — коэффициент ежегодного списания судов в несколько раз превышает коэффициент обновления. Кроме того, появляются новые суда с установками, производительность которых намного выше, чем в установках существующих судов. В результате судовладелец находится перед выбором: либо производить покупку нового судна, либо производить модернизацию отдельных ее элементов, чтобы продлить срок эксплуатации судна и увеличить его производительность. Поскольку далеко не каждый судовладелец может позволить себе закупить новое судно, была использована глубокая модернизация всей судовой электроэнергетической системы (СЭС) путем замены оборудования на зарубежный аналог. При этом установленная зарубежная аппаратура после монтажа становится частью всей СЭС. На рис. 1 приведена структурная схема транспортировки электроэнергии СЭС.

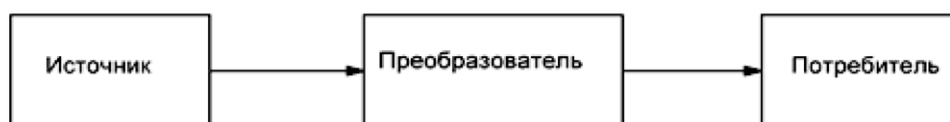


Рис. 1. Структурная схема транспортировки электроэнергии СЭС

По своей структуре СЭС состоит из трех основных блоков:

- источник (дизель-генераторный агрегат — ДТА);
- преобразователь;
- потребитель (приемник).

Модернизация СЭС в настоящее время осуществляется заменой одного из ранее указанных блоков, которая приводит к тому, что необходимо производить также замену либо источника, либо преобразователя. Замена источника является довольно дорогостоящей процедурой, поскольку чтобы добраться до машинно-котельного отделения, необходимо производить вырез нескольких палуб, на что уйдет много времени и средств. Так, например, в связи с тем, что вырез и сварка только одной палубы судна типа СРТМ обойдется судовладельцу порядка 200 тыс. руб., для него этот способ невыгоден. Поэтому из экономических соображений целесообразной становится модернизация элементов переработки электрической энергии (например, путем установки источника бесперебойного питания).

В условиях развития современного рыбопромыслового флота в СЭС начинают внедрять современные электронные источники энергии (ионисторы, ультраконденсаторы) и полупроводниковые приборы управления как слаботочной, так и силовой техникой. Силовая электроника относится к стремительно развивающейся технической отрасли. Наряду с ее развитием появились новые источники электрической энергии, преобразующие постоянную электрическую энергию в переменную при помощи различных полупроводниковых устройств (GTO, биполярные транзисторы с изолированной базой IGBT, мощные полевые транзисторы MOSFET). Появление в силовой электронике таких устройств привело к улучшению качества и увеличению спектра применения техники преобразования электрической энергии. Особенностью улучшения является значительное увеличение быстродействия полупроводниковых преобразователей, что позволило снизить показатели массы и габаритов, увеличить КПД, надежность, а также реализовать микропроцессорное управление и широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) [1].

Возможность использования полупроводниковых силовых преобразователей в СЭС и других отраслях дает большой экономический эффект, но оставляет за собой много неизученных вопросов, связанных с энергосбережением. В связи с ростом уровня индустриализации, большим количеством устаревших технологий и преобладанием природоемких отраслей данная проблема становится особо актуальной. Поэтому все большее внимание уделяется созданию и исследованию новых альтернативных источников питания [2], [3]. Для того, чтобы оценить результаты предлагаемой модернизации, необходимо разработать математическую и имитационную модель

параллельной работы источника бесперебойного питания и ДГА и проанализировать все преимущества и недостатки.

Уравнение дизель-генератора (ДГ) [4]:

$$J \frac{dw}{dt} = M_d - M_r, \quad (1)$$

где Jdw/dt — избыточный динамический момент; M_d — вращающий момент дизеля; M_r — тормозной момент, вызванный нагрузкой генератора; J — момент инерции вращающихся частей дизеля и генератора; w — угловая частота вращения; t — время работы.

Величина вращающегося момента дизеля M_d будет зависеть от положения топливной рейки топливного насоса и от угловой частоты вращения вала:

$$M_d = f(x, w), \quad (2)$$

где x — относительное перемещение заслонки.

Выполнив линеаризацию, получим:

$$\begin{aligned} M_d &= \frac{df}{dx} x + \frac{df}{dw} w; \\ M_d &= k_1 x + k_2 w. \end{aligned} \quad (3)$$

Величина M_r при постоянной частоте вращения пропорциональна нагрузке λ : $M_r = \alpha \lambda$.

Подставив значения M_r и M_d в уравнение (1) и учитывая, что $df/dw < 0$, получим:

$$\begin{aligned} Jpw &= k_1 x - k_2 w - \alpha \lambda; \\ \left(\frac{J}{k_2} p + 1 \right) w &= \frac{k_1}{k_2} x - \frac{\alpha}{k_2} \lambda. \end{aligned}$$

Тогда уравнение динамики ДГА примет вид:

$$\left(\frac{J}{k_2} p + 1 \right) w = \frac{k_1}{k_2} x - \frac{\alpha}{k_2} \lambda; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} w &= \frac{\frac{k_1}{k_2} x - \frac{\alpha}{k_2} \lambda}{\frac{J}{k_2} p + 1}; \\ w &= \frac{k_1 x - \alpha \lambda}{Jp + k_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

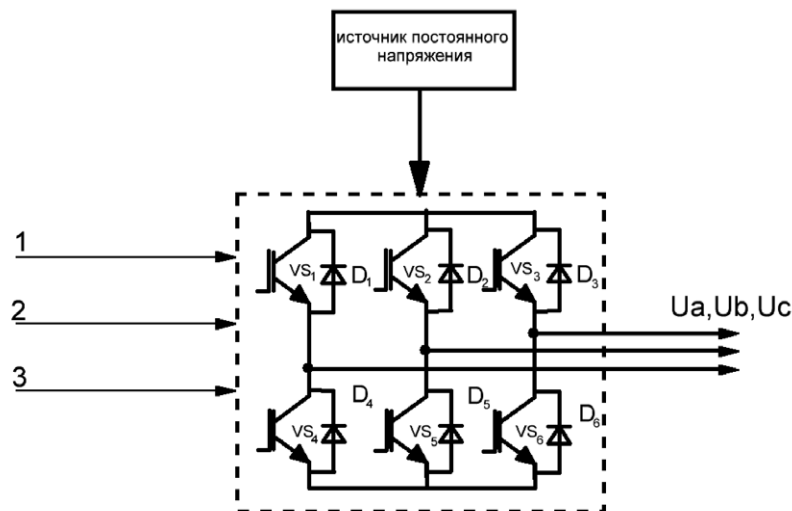


Рис. 2. ШИМ-инвертор

При реализации ШИМ-инвертора подаваемый на входы трехфазного ШИМ-модулятора (рис. 2) управляющий сигнал каждой фазы имеет вид:

$$u_{yA} = K_m U_m \sin(\theta); \quad (6)$$

$$u_{yB} = K_m U_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (7)$$

$$u_{yC} = K_m U_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right), \quad (8)$$

где $\theta = 2\pi f_{\text{вых}} t$; U_m — максимально допустимая амплитуда управляющего сигнала, не вызывающего перемодуляцию.

При $\omega t = \theta$ будет наблюдаться фазовый сдвиг между напряжением ДГ и судовой трехфазной сетью, близкий к нулю. Исходя из этого, подаваемый на входы трехфазного ШИМ-модулятора управляющий сигнал каждой фазы будет иметь вид:

$$u_{yA} = K_m U_m \sin\left(\frac{k_1 x - \alpha \lambda}{Jp + k_2}\right);$$

$$u_{yB} = K_m U_m \sin\left(\frac{k_1 x - \alpha \lambda}{Jp + k_2} - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$u_{yC} = K_m U_m \sin\left(\frac{k_1 x - \alpha \lambda}{Jp + k_2} - \frac{4\pi}{3}\right).$$

По рассчитанной математической модели был построен блок в пакетах *Simulink* и *Simscape* (рис. 3 на с. 196). При параллельной работе трехфазного ШИМ-инвертора и судового синхронного генератора необходимо выполнение условий синхронизации. Включение в параллель даже неинерционного источника электрической энергии является сложным технологическим процессом, обеспечиваемым при выполнении ряда условий. В частности для безударного включения источника на параллельную работу (в данном случае даже инвертора) необходимо выполнение следующих условий синхронизации:

для трехфазной системы питания:

- напряжение U_c сети, к которой подключается источник, должно равняться ЭДС (Е) источника, т. е. $|U| = |E|$;
- значения частоты питающей сети f_c и частоты подключаемого источника f должны совпадать, т. е. $f_c = f$;
- совпадение по фазе одноименных векторов фазных напряжений подключаемого источника и сети, т. е. $\varphi = 0^\circ$;
- порядок чередования фаз подключаемого в параллель источника должен быть такой же, как и на шинах электрической сети [5].

При выполнении этих условий источник успешно войдет в синхронизм с сетью и не даст существенных отклонений по частоте питающей сети и напряжению, определенных Правилами Российского морского регистра судоходства (далее — Правила РМРС) в судовых электроэнергетических системах и требованиями межгосударственного стандарта [6], [7] в береговых электроэнергетических системах.

Разработка виртуальной модели позволит понять структуру объекта исследования, а также подробно изучить причинно-следственные связи [8]. Для исследования параметров качества электрической энергии в программе *Matlab* R2012a в пакетах *Simulink* и *Simscape* была исследована имитационная модель параллельной работы ДГА и трёхфазного управляемого инвертора, собранная по схеме устройства для определения и ликвидации предотказных состояний синхронной ма-

шины [2], [9]. Был произведен следующий эксперимент: на шины электрической сети, питающейся от одиночного ДГ мощностью $S = 2000$ кВ·А в момент времени $t = 3$ с была подключена активно-индуктивная нагрузка, соизмеримая с мощностью одного генератора, которая затем через одну секунду была отключена.

После восстановления при помощи систем автоматического регулирования напряжения и частоты в момент времени $t = 8$ с было выполнено повторное нагружение ДГА такой же активно-индуктивной мощностью, с той лишь разницей, что в этот же момент для подавления динамического возмущения был включен на параллельную работу трехфазный инвертор с учетом четырех условий синхронизации трехфазных источников электрической энергии переменного тока.

В ходе эксперимента на осциллографе были зафиксированы данные, приведенные на рис. 4. В момент динамического возмущения без дополнительного источника питания отклонение по напряжению составило 32 %, по частоте вращения — 6 % с максимальной продолжительностью 2 с по напряжению и 1,5 с по частоте вращения ДГА. В момент динамического возмущения при параллельной работе ДГА с трехфазным инвертором максимальное отклонение по напряжению составило 14 %, по частоте вращения — 3 % с максимальной продолжительностью 0,8 с по напряжению и по частоте вращения ДГА. Как видно из полученных данных, включение на параллельную работу дополнительного безынерционного источника трёхфазного питания с ДГА улучшит параметры качества электрической энергии при динамических возмущениях в два раза.

Отличительной особенностью и недостатком ДГ является его высокая инерционность, поэтому в различных модификациях такие агрегаты изготавливаются с турбиной для снижения реакции инерции дизеля на выходные параметры генератора. Турбина имеет высокую массу и габариты, поэтому в электроэнергетических системах транспортных судов турбины не используются.

Рассмотрим требования к качеству электрической энергии судовых электростанций, регламентируемые Правилами РМРС:

- максимальный допустимый провал напряжения $\pm \Delta U_{\max}$, %: от –15 % до +20 % при включении и отключении нагрузки, составляющий $60 \% \cdot I$ и с $\cos \varphi = 0,4$;
- при включении и отключении стопроцентной нагрузки изменение частоты вращения первичных двигателей не должно превышать ± 10 % от номинального значения, а частота вращения в статическом режиме не должна отличаться более чем на ± 5 % номинальной;
- время восстановления системы в установившемся режиме не более 1 с;
- размах частоты вращения ДГ при нагрузках от 25 % до 100 % номинальной должен находиться в пределах от –1 % до +1 % от номинальной;
- при резком отключении стопроцентной нагрузки генератора кратковременное отклонение частоты вращения ДГ не должно превышать 10 %;
- при резком включении или отключении до 50 %-й расчетной нагрузки ДГ кратковременное изменение частоты вращения первичного двигателя не должно превышать 10 %-ю расчетную частоту вращения;
- при любых нагрузках от 0 до 100 % установившаяся частота вращения ДГ не должна превышать расчетную частоту более чем на 5 %;
- установившаяся частота вращения не должна испытывать колебания более чем на ± 1 % частоты вращения, соответствующей установившейся нагрузке генератора [6].

Анализируя приведенные требования, а также полученные экспериментальные данные, можно судить о том, что системы автоматического регулирования не всегда способны обеспечить динамическую устойчивость при одиночной работе генератора на электрическую сеть. Кроме того, включение потребителей, мощность которых соизмерима с мощностью одного генератора в составе электростанций, может привести к увеличению отклонений параметров напряжения и частоты вращения, значения которых выходят за рамки установленных требований РМРС. Решением данной проблемы будет являться запуск второго ДГА, что является достаточно нецелесообразным с точки зрения энергоэффективности. Наиболее экономически выгодным и надежным будет подключение дополнительного безынерционного источника питания через управляемый трехфазный инвертор.

Рис. 3. Имитационная модель электроэнергетической системы

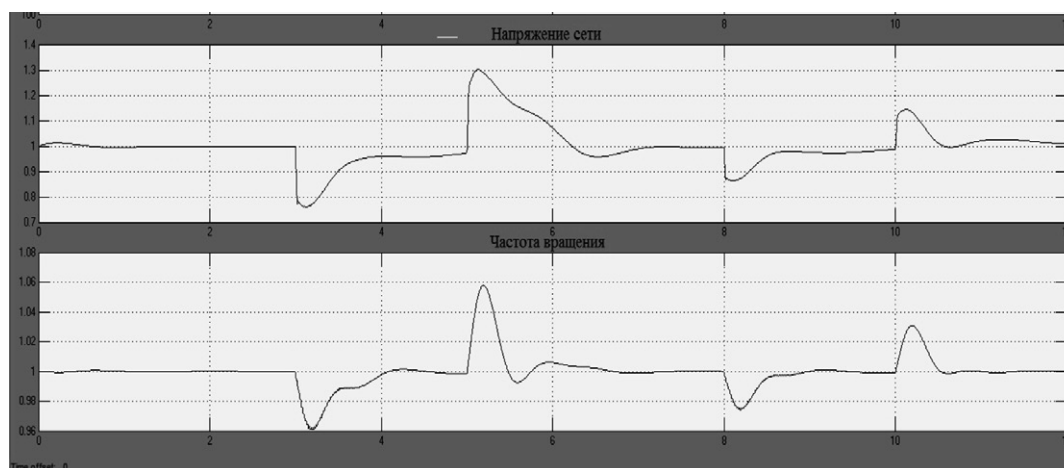


Рис.4. Зависимость напряжения и частоты вращения от времени имитационной модели ДГА

Таким образом, на основании представленных моделей можно сделать вывод о том, что включение на параллельную работу с ДГА трехфазного инвертора не только не приведет к снижению энергозатрат до 20 % [10], но и позволит улучшить параметры качества электрической энергии, что позволит при динамических возмущениях энергосистемы поддерживать работу электростанции в нормальном режиме. Кроме того, применение интегральных схем, повышающее качество электроэнергии, позволяет устранить помехи и снизить скачки напряжения.

Список литературы

1. Труднев С. Ю. Исследование параллельной работы ШИМ-инвертора и однофазной сети / С. Ю. Труднев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 60–67.
2. Труднев С. Ю. Разработка и исследование модели устройства активной защиты генераторного агрегата от кратковременных перегрузок / С. Ю. Труднев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (26). — С. 23–31.
3. Труднев С. Ю. Компьютерное моделирование режимов кратковременных перегрузок работы судовой электростанции / С. Ю. Труднев, Н. Н. Портнягин // 5-я межвуз. науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» (14 мая 2014 г.). — СПб., 2014. — С. 154–161.
4. Краснов В. В. Основы теории расчета судовых электроэнергетических систем: Моделирование для исследования специальных режимов: учеб. пособие / В. В. Краснов, П. А. Мещанинов, А. П. Мещанинов. — Л.: Судостроение, 1989. — 328 с.
5. Сергиенко Л. И. Электроэнергетические системы морских судов / Л. И. Сергиенко, В. В. Миронов. — М.: Транспорт, 1991. — 368 с.
6. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Транспорт, 2010. — 280 с.
7. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013. — М.: Стандартинформ, 2013. — 16 с.
8. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. — М.: Корона-Век, 2008. — 368 с.
9. Труднев С. Ю. Патент RU 133364 U1 «Устройство для определения и ликвидации предотказных состояний синхронной машины» / С. Ю. Труднев, Н. Н. Портнягин. — Заявлено 07.11.2012; Опубл. 10.10.13 г. Бюл. 28.
10. Григорьев А. В. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 39–43.

АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ СЕТИ

ANALYSIS OF IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY AT ACTIVE FILTERING OF HARMONIC DISTORTION OF NETWORK

Актуальность статьи связана с непрерывным ростом требований к повышению качества электрической энергии, которые обуславливают применение более совершенных методов по её поддержанию на необходимом для систем энергоснабжения уровне. В статье рассматриваются системы активной фильтрации гармонических искажений, актуальной в наибольшей степени для автономных электроэнергетических систем, включая большинство систем водного транспорта. Приведена структура и принципы подходов к активной фильтрации гармонических искажений в сети. Проанализирован и описан положительный опыт использования активных фильтров, выявлены существенные недостатки по использованию различных компонентов индивидуальной и централизованной активной фильтрации с целью дальнейших исследований и проведения экспериментальных опытов по созданию более совершенного активно-резонансного устройства компенсации гармоник токов и напряжений.

The relevance of article associated with the continuous increasing demands to improvement of quality of electric energy, that determine the application of improved methods for keeping it at a desired level for power supply systems. In article considers the system of active filtering of harmonic distortion in the network, the most topical for independent electric power systems, including the majority of water transport systems. Is described the positive experience of using active filters and identifies possible violations and deficiencies on the use of the various components of the individual and centralized active filter in order to further research and the pilot experiments to create a more perfect active-resonance harmonics compensation device of currents and voltages.

Ключевые слова: гармонические искажения, активный фильтр, амплитудно-импульсная модуляция, резонанс токов и напряжений.

Key words: harmonic distortions, active filter, pulse-amplitude modulation, resonance of currents and voltages.



ЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ системы являются основной структурой техногенного комплекса различных субъектов использования и потребления электрической энергии. При этом сложность самой системы и происходящих в ней процессов приводит к тому, что возникают риски аварийных ситуаций. Таким образом, необходимо разрабатывать различные мероприятия, направленные на передачу по электроэнергетическим системам качественной электрической энергии. Известно, что качественная электрическая энергия должна обладать стабильным напряжением синусоидальной формы и частотой, изменяющейся в оптимальных пределах. Нормы этих показателей определены в Межгосударственном стандарте ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» для береговых электрических сетей и в Правилах классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства для судовых электроэнергетических систем [1], [2].

Нарушение условий, связанных с процессом выработки, преобразования, потребления и распределения электроэнергии, чаще всего возникают из-за большого количества потребителей, имеющих нелинейные вольт-амперные характеристики, которые, в свою очередь, создают искажения синусоидальной формы кривой тока и напряжения, так называемые *гармоники*. Источниками гармоник служат синхронные генераторы электростанций, силовые трансформаторы, работающие при повышенном напряжении на их выводах, различного рода преобразовательные устройства переменного тока в постоянный и другие энергопотребители.

В настоящее время установлено существование различных спектров гармоник, в различной степени оказывающих влияние на электроэнергетические системы. При этом наибольший убыток электроэнергетическим и коммутационным системам, а также электрооборудованию наносят именно высшие гармоники. Например, при возникновении гармоник в сети в синхронных машинах могут возникать дополнительные потери активной мощности, нагрев статора и ротора, опасные вибрации из-за несимметрии токов в обмотках электрических машин [3]. Кроме того, существует повышенная опасность возникновения резонансных явлений в электроэнергетических сетях.

Возникающие вследствие гармонических искажений токи нулевой последовательности, протекающие через нулевой проводник меньшего сечения по отношению к фазным проводникам, вызывают его сильный нагрев. Зафиксирован ряд случаев возникновения возгораний при перегреве нулевых проводников, сечение которых составляло 25 или 50 % фазного провода [4]. Убыток от высших гармонических возмущений ставит перед поставщиками электрической энергии задачу по снижению уровней высших гармоник в электрических сетях для передачи качественной электрической энергии потребителю [5].

Борьба с высшими гармониками является наиболее эффективной, когда при проектировании энергосистемы известно примерное количество линейных и нелинейных нагрузок. При этом на практике нагрузка имеет переменный характер, т. е. наблюдается рост числа нелинейных потребителей, ухудшающих качество энергоснабжения как в городских энергосетях с появлением электронных бытовых устройств, так и на промышленных предприятиях и судовых электроэнергетических системах при их развитии, модернизации и автоматизации. Решением данной проблемы является создание различных устройств для подавления искажений электрического сигнала с высоким КПД и минимальными массогабаритными показателями. Уменьшение гармонических составляющих возможно с помощью применения пассивных и активных фильтров. Последние считаются наиболее эффективным решением, но имеют свои недостатки.

Современные активные фильтры могут осуществлять фильтрацию гармоник для индивидуальных нагрузок, например, нагрузок с частотно-регулируемым приводом, групповую фильтрацию, при которой можно компенсировать выбранную группу нагрузок и центральную фильтрацию гармоник при подсоединении фильтра в общей точке нескольких присоединений, не затрагивая текущую конфигурацию системы. Индивидуальная фильтрация гармоник тока нелинейных нагрузок может осуществляться с помощью использования схемы, приведенной на рис. 1 [6].

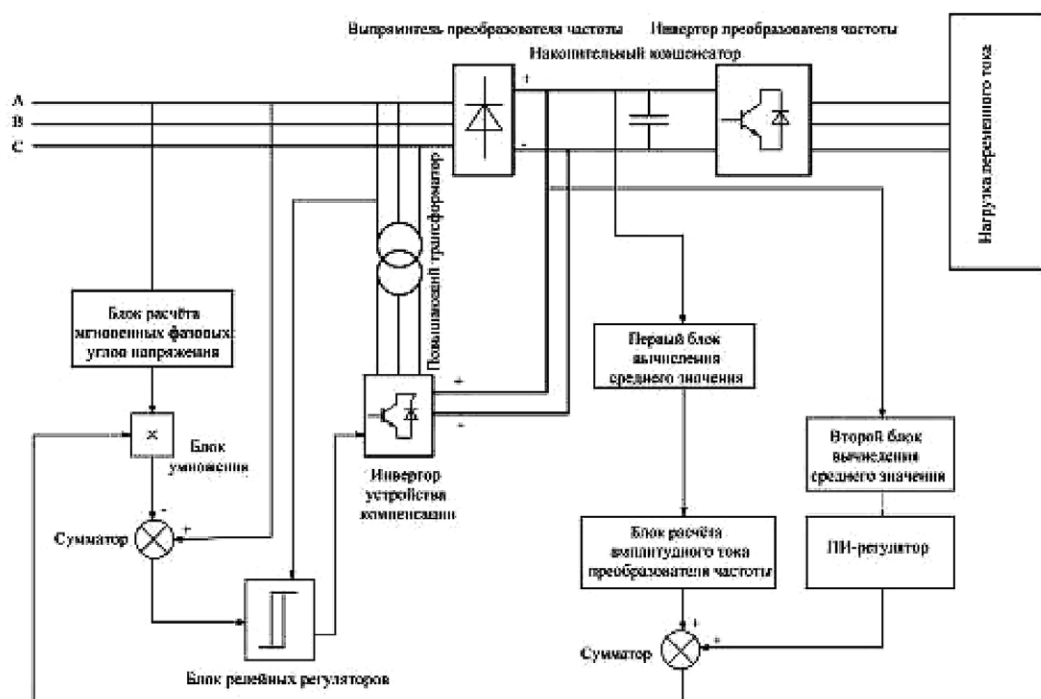


Рис. 1. Индивидуальный фильтр высших гармоник нелинейной нагрузки

Нелинейная нагрузка на схеме представлена входным диодным выпрямителем преобразователя частоты. Для уменьшения влияния мощности искажения и повышения коэффициента мощности, потребляемой нелинейной нагрузкой, блок расчёта мгновенных фазовых углов напряжения снимает напряжения с фаз сети u_{1A} , u_{1B} , u_{1C} с помощью датчиков напряжения и рассчитывает синусы мгновенных фазовых углов напряжения сети [6]:

$$\begin{cases} \sin(2\pi f_1 t) = \frac{\sqrt{3}u_{1A}}{2\sqrt{u_{1A}^2 + u_{1B}^2 + u_{1A} \cdot u_{1B}}}; \\ \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}u_{1B}}{2\sqrt{u_{1A}^2 + u_{1B}^2 + u_{1A} \cdot u_{1B}}}; \\ \sin\left(2\pi f_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}u_{1C}}{2\sqrt{u_{1A}^2 + u_{1B}^2 + u_{1A} \cdot u_{1B}}}, \end{cases} \quad (1)$$

где f_1 — частота напряжения сети; t — текущее время.

В блоке умножения синусы мгновенных фазовых углов напряжения умножаются на заданную амплитуду тока сети I_{1m}^* , формируя мгновенные значения фазовых токов I_{1A}^* , I_{1B}^* , I_{1C}^* :

$$\begin{cases} I_{1A}^* = I_{1m}^* \sin(2\pi f_1 t); \\ I_{1B}^* = I_{1m}^* \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3}\right); \\ I_{1C}^* = I_{1m}^* \sin\left(2\pi f_1 t - \frac{2\pi}{3}\right). \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, заданный ток совпадает по фазе с напряжением, что позволяет поддерживать значение коэффициента мощности, близкое к единице. Для уменьшения пульсаций, возникающих из-за постоянного обмена мощностями между инвертором и конденсатором, значения постоянного тока с преобразователя частоты I_d и постоянного тока с устройства компенсации I_{df} усредняют в первом и втором блоках вычисления среднего значения в течение определённого промежутка времени T_k :

$$\begin{cases} I_{dA} = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} I_d dt; \\ I_{dfA} = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} I_{df} dt. \end{cases} \quad (3)$$

Для стабилизации коэффициента амплитуды переменного тока вычисляют её значение в блоке расчёта амплитудного значения переменного тока, корректируемого с помощью ПИ-регулятора:

$$I_{1mp}^* = \sqrt{2k_{cx} I_{dc}}, \quad (4)$$

где $k_{cx} = 0,816$ — известный коэффициент выпрямления по току трёхфазной мостовой схемы.

Трёхфазный переменный ток с устройства компенсации I_f^* имеет вид:

$$I_f^* = I_{n1} - I_1^*, \quad (5)$$

где I_1^* — задание на трёхфазный ток сети с выхода блока умножения; I_{n1} — трёхфазный переменный ток с преобразователя частоты.

Поддержание заданного тока с устройства компенсации I_f^* осуществляется с помощью блока релейных регуляторов, который определяет разницу между заданным и фактическим значениями мгновенных фазных токов с устройства компенсации ΔI_{fA} , ΔI_{fB} , ΔI_{fC} следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta I_{fA} = I_{fA}^* - I_{fA}; \\ \Delta I_{fB} = I_{fB}^* - I_{fB}; \\ \Delta I_{fC} = I_{fC}^* - I_{fC}, \end{cases} \quad (6)$$

где $I_{fA}^*, I_{fB}^*, I_{fC}^*$ — значения мгновенных фазных токов с устройства компенсации; I_{fA}, I_{fB}, I_{fC} — фактические значения мгновенных фазных токов с устройства компенсации.

Значения сигналов Q_A, Q_B, Q_C с выходов релейных регуляторов, воздействующие на работу тиристорных ключей инвертора устройства компенсации, определяются по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} Q_A = 1 \text{ при } \Delta I_{fA} \geq \frac{h}{2}; Q_A = -1 \text{ при } \Delta I_{fA} \leq -\frac{h}{2}; \\ Q_B = 1 \text{ при } \Delta I_{fB} \geq \frac{h}{2}; Q_B = -1 \text{ при } \Delta I_{fB} \leq -\frac{h}{2}; \\ Q_C = 1 \text{ при } \Delta I_{fC} \geq \frac{h}{2}; Q_C = -1 \text{ при } \Delta I_{fC} \leq -\frac{h}{2}, \end{cases} \quad (7)$$

где h — зона гистерезиса, являющаяся регулируемым параметром регулятора и обеспечивающая задержку включения во избежание одновременной работы тиристорных ключей и инвертора устройства компенсации [7].

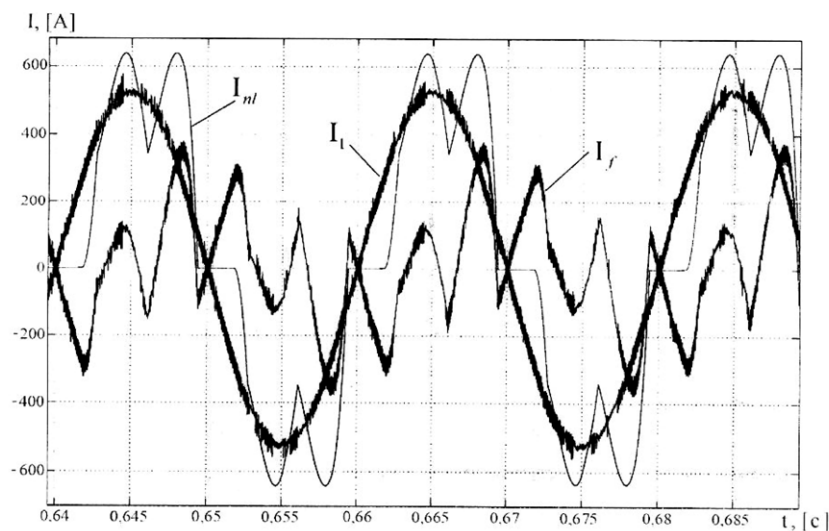


Рис. 2. Диаграмма токов при индивидуальной фильтрации высших гармоник от нелинейной нагрузки

На рис. 2 приведена диаграмма токов при применении описанного индивидуального фильтра высших гармоник, которая показывает уменьшение гармонических искажений трёхфазного тока сети одной фазы I_l преобразователя частоты. К недостаткам такой системы фильтров можно отнести, во-первых, то, что использование релейных регуляторов практически невозможно в системе регулирования, если величина переходного процесса будет больше, чем задержка в изменении выходного сигнала после начала изменения входного сигнала (транспортное запаздывание) [7]. Данное обстоятельство отражается на качестве регулирования пульсаций токов с устройства компенсации. В такой схеме целесообразно использовать регуляторы на основе ПИД-регулирования. Во-вторых, применение индивидуальных активных фильтров не всегда возможно, так как их необходимо применять для большинства нелинейных нагрузок в отдельности, что может привести к значительным затратам и увеличению массогабаритных показателей оборудования. Таким образом, борьба с гармоническими искажениями более эффективна при централизованной или групповой фильтрации гармоник. Примером централизованной фильтрации искажений в энергосистеме

может являться метод уменьшения гармоник при компенсации отклонений напряжения сети, схема которого приведена на рис. 3.

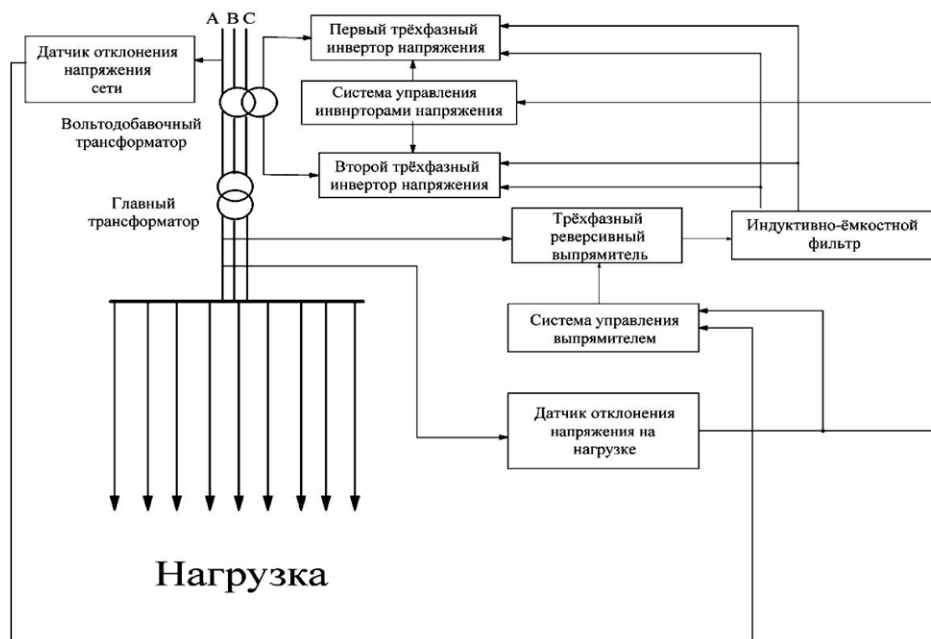


Рис. 3. Схема амплитудно-импульсного метода уменьшения гармоник

При возникновении отклонения напряжения в сети от номинальных режимов в схеме создается добавочное напряжение, обратное по знаку и равное по величине сумме высших гармоник напряжения сети, при помощи вольтодобавочного трансформатора, который автоматически компенсирует отклонение напряжения на входе у главного трансформатора и стабилизирует напряжение на нагрузке. Основным параметром, определяющим массогабаритные показатели, является мощность вольтодобавочного трансформатора как средства целенаправленного воздействия на несинусоидальные искажения сети. Как показывает опыт, предпочтительными являются схемы включения такого фильтра перед группой нелинейных потребителей или перед одним мощным потребителем либо централизованно. Из-за подключения в сеть вольтодобавочного трансформатора последовательно, его мощность определяется добавочным напряжением, которое состоит из суммы высших гармоник напряжения сети, номинальным током нелинейной нагрузки или суммарным номинальным током группы потребителей. Подобный метод активной компенсации гармоник является наиболее перспективным, поскольку может быть реализован в автономных и судовых электроэнергетических системах, особенностью которых является использование трёхпроводной или четырёхпроводной системы электроснабжения с изолированной нейтралью [8].

Управление вольтодобавочным устройством осуществляется с помощью сигнала разности напряжения сети, который содержит весь спектр гармоник, и первой гармоники напряжения:

$$\Delta U = U_{\text{сети}} - U_1, \quad (8)$$

где $U_{\text{сети}} = U_1 + \sum_{i=2}^n U_i$ — напряжение сети; U_1 — первая гармоника напряжения, равная 50 Гц.

Таким образом, сигнал разности будет представлен в виде суммы гармоник напряжения, которые находятся в противофазе с высшими гармониками напряжения сети:

$$\Delta U = \sum_{i=2}^n U_i, \quad (9)$$

где i — номер гармоники.

Для высших гармоник напряжение вольтодобавки будет определяться следующим образом [8]:

$$U_{\text{вд}} = U_i \cdot k_{\text{вд}}, \quad (10)$$

где $k_{\text{вд}}$ — коэффициент усиления вольтодобавочного устройства.

Из выражения (10) видно, что каждая гармоника напряжения сети будет уменьшаться пропорционально увеличению $k_{\text{вд}}$.

Регулирование добавочного напряжения производится с помощью импульсных напряжений двумя трёхфазными инверторами напряжения, имеющими общую систему управления, и амплитудного регулирования трёхфазным реверсивным выпрямителем со своей системой управления.

С целью улучшения качества выходного напряжения в схеме заданы области амплитудно-импульсного регулирования напряжения. В области больших отклонений напряжения производится амплитудное регулирование, при малых отклонениях напряжения — импульсное регулирование, а при промежуточных отклонениях напряжения — одновременно как амплитудное, так и импульсное регулирование.

Снижение гармонического искажения выходного напряжения при его стабилизации обеспечивается при помощи трёхфазного реверсивного выпрямителя путём изменения соотношения отстающего и опережающего амплитудного регулирования и степенью импульсного регулирования добавочного напряжения в функции обратной связи. Применение в системе управления амплитудно-импульсной модуляции позволяет улучшить качество выходного тока и напряжения, что открывает перспективы её использования в автономных электротехнических комплексах (например, таких как СЭС) [9, с. 65, 66]. К недостаткам данного метода можно отнести тот факт, что использование в схеме регулирования функции обратной связи может привести к неустойчивости управления при возможной модификации энергосети. Кроме того, для использования активной фильтрации необходимо выделять дополнительное пространство, поскольку устройство должно регулировать высшие гармоники в каждой из трёх линий трёхфазной сети. Ещё одним недостатком рассматриваемого способа является проблема регулирования тока между различными активными фильтрами, каждый из которых может быть включён в одну и ту же цепь энергосистемы. При таком подключении каждый активный фильтр попытается скомпенсировать потери на другом фильтре.

Следует отметить, что нелинейные гармонические искажения в сети переменного тока чаще всего снижаются с помощью использования в системе активной фильтрации пассивных элементов, таких как автотрансформаторы и блоки конденсаторных батарей, которые на частотах отдельных гармоник могут вступать в резонанс напряжений или резонанс токов, увеличивая тем самым амплитуду гармонических искажений. Использование в качестве компенсации реактивной мощности на подстанциях конденсаторных батарей также может привести к резонансу. Вместе с тем правильный подбор значений индуктивности и ёмкости пассивных элементов при уже известных и измеренных гармонических искажениях может действовать в совокупности в качестве успокоительных контуров, изменяющих резонансную частоту и предотвращающих возникновение резонансных пиков. К сожалению, такие фильтры не могут подавлять изменяющийся спектр гармоник, поэтому возможно усиление амплитуд других некомпенсированных гармонических искажений вследствие резонанса, что приводит к сбоям в энергопитании групп энергоприёмников. Этот резонанс может возникать на шинах трансформатора, что приводит к резкому увеличению тока и изменению его гармонического состава в резонансном контуре. Примером предотвращения резонансных пиков может служить регулируемый резонансный контур [10].

На рис. 4 приведена высоковольтная трёхфазная энергосистема, получающая энергию от высоковольтной кабельной линии. Регулируемый резонансный контур, который включён между высоковольтной оболочкой кабеля и массой, содержит регулируемый резистор, конденсатор и индуктивность, соединённые параллельно. Регулируемый резистор является гасителем резонансных пиков, конденсатор выполняет роль преобразователя частоты и обеспечивает сдвиг резонансной

частоты, индуктивность выполняет роль стабилизатора напряжения для обеспечения ограничения аномальных всплесков напряжения на резонансном контуре.

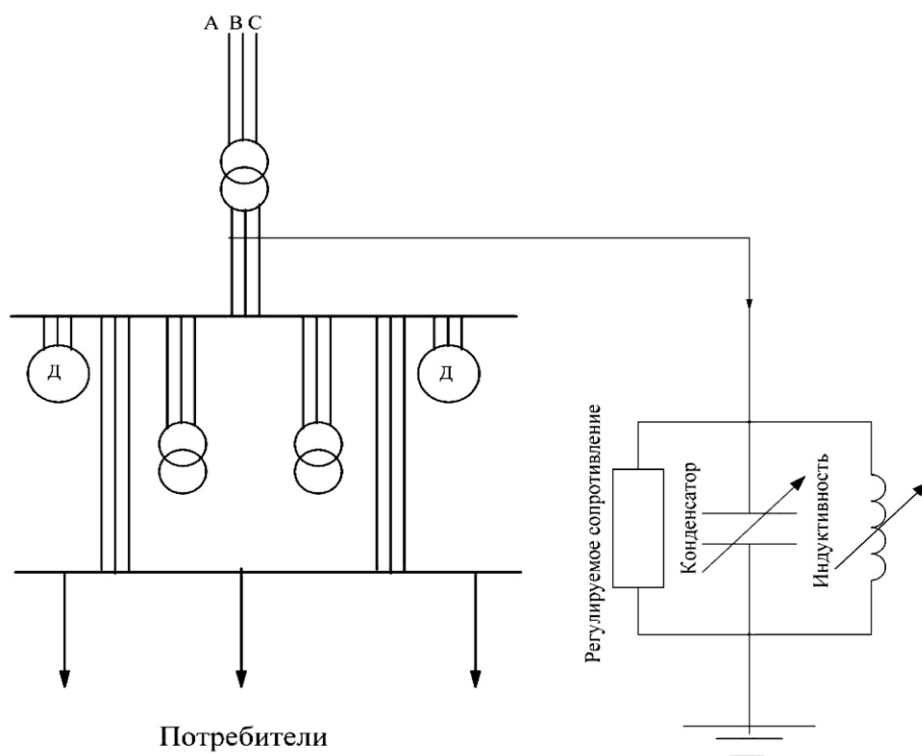


Рис. 4. Высоковольтная трёхфазная энергосистема с регулируемым резонансным контуром

На рис. 5 приведена схема поперечного сечения высоковольтного кабеля, применяемого в энергосистеме для передачи энергии, компонентами которого служат кабельные жилы. Каждую жилу окружает изолирующий экран. Подавление резонанса осуществляется на основе такого физического явления, как резонанс токов при параллельном соединении резистора, конденсатора и катушки индуктивности, где резистор, используемый для погашения резонансных пиков, будет нагрузкой в схеме резонансного контура, конденсатор обеспечивает сдвиг резонансной частоты, а катушка индуктивности по своей природе необходима для ограничения амплитудных значений гармонических токов. Правильный выбор ёмкости конденсатора и индуктивности катушки может снизить амплитуду гармоник в электросетях. Этот вывод можно доказать математически. Все приведенные далее рассуждения верны и для всех гармоник в отдельности других периодических напряжений.

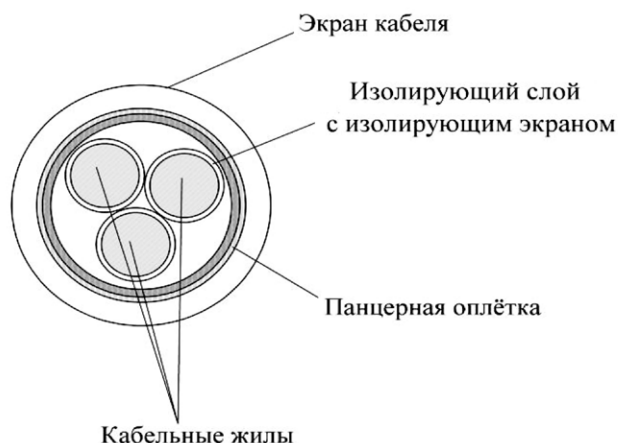


Рис. 5. Схема поперечного сечения высоковольтного кабеля

Сила тока, проходящая по цепи регулируемого резонансного контура, будет равна согласно первому закону Кирхгофа [11]:

$$I = I_R + I_C + I_L \quad (11)$$

где I_R — ток в контуре с резистором; I_C — ток в контуре с конденсатором; I_L — ток в контуре с индуктивностью.

Ток в контуре с конденсатором определяется по следующей формуле:

$$I_C = \frac{E_m}{Z_1} \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (12)$$

где $Z_1 = X_C$ — полное сопротивление в цепи с конденсатором; φ_1 — сдвиг по фазе при ёмкостной нагрузке.

Ток в этом контуре

$$I_C = -\frac{E_m}{X_C} \sin(\omega t). \quad (13)$$

Ток в контуре с катушкой индуктивности определяется следующим образом:

$$I_L = \frac{E_m}{Z_2} \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (14)$$

где $Z_2 = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ — полное сопротивление в цепи с катушкой, если не пренебрегать её активным сопротивлением; φ_2 — сдвиг по фазе при индуктивной нагрузке.

Очевидно, что полный ток в цепи определяется суммой контурных токов в цепи с конденсатором и катушкой индуктивности:

$$I = \frac{E_m R}{Z_2^2} \cos \omega t + E_m \left(\frac{X_L}{Z_2^2} - \frac{1}{X_C} \right) \sin \omega t, \quad (15)$$

где $\frac{E_m R}{Z_2^2} \cos \omega t$ — активная составляющая тока; $E_m \left(\frac{X_L}{Z_2^2} - \frac{1}{X_C} \right) \sin \omega t$ — реактивная составляющая тока; X_C, X_L — реактивное сопротивление конденсатора и катушки соответственно; ω — циклическая частота.

Коэффициенты активной и реактивной мощности для полной цепи будут определяться следующим образом:

$$\begin{cases} \cos \varphi = \frac{ZR}{Z_2^2}; \\ \sin \varphi = Z \left(\frac{1}{X_C} - \frac{X_L}{Z_2^2} \right), \end{cases} \quad (16)$$

где Z — полное сопротивление в цепи с конденсатором и индуктивностью.

В таком случае полная проводимость цепи резонансного контура составит

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{Z_2^2} - \frac{2X_L}{X_C Z_2^2} + \frac{1}{X_C^2}}. \quad (17)$$

Имея полную проводимость цепи контура, можно найти амплитуду гармонического тока, которая будет выражена следующей формулой:

$$I_m = \frac{E_m}{Z} = E_m \sqrt{\frac{1}{Z_2^2} - \frac{2X_L}{X_C Z_2^2} + \frac{1}{X_C^2}}, \quad (18)$$

откуда видно, что изменение амплитуды гармонического тока в меньшую сторону станет возможным тогда, когда будет выполняться следующее неравенство:

$$\frac{2X_L}{X_C Z_2^2} > \frac{1}{X_C^2}. \quad (19)$$

Имея в виду, что реактивное сопротивление конденсатора зависит от циклической частоты и ёмкости $X_C = \frac{1}{\omega C}$, неравенство можно записать следующим образом:

$$C < \frac{2X_L}{\omega Z_2^2}. \quad (20)$$

Из приведенных выражений видно, что если изменять реактивные сопротивления конденсатора и катушки путём изменения ёмкости и индуктивности, можно добиться изменения амплитуды гармонического тока. Таким образом, необходимо иметь систему управления, которая должна контролировать и изменять ёмкость и индуктивность до тех пор, пока измеряемое амплитудное значение тока в сети не достигнет минимального значения, т.е. до тех пор, пока оно не будет способствовать подавлению резонанса.

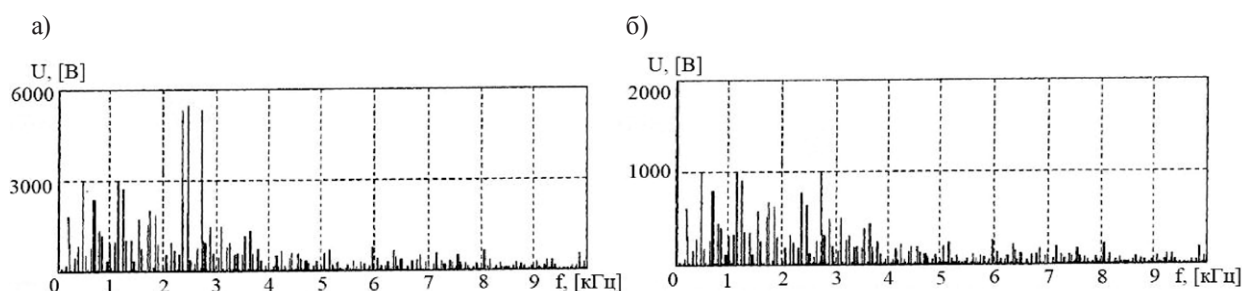


Рис. 6. Графики спектральной функции напряжения высоковольтной энергосистемы:
а — без использования регулируемого резонансного контура;
б — при использовании регулируемого резонансного контура

На рис. 6 приведены графики спектральной функции напряжения такой энергосистемы, которые отображают напряжения в линиях передач на 33 кВ, при этом по оси ординат отложена амплитуда напряжения, а по оси абсцисс — частота (0 – 10) кГц. На рис. 6 а можно заметить, что в частотном диапазоне приблизительно от 2 кГц до 3 кГц наблюдается несколько всплесков напряжения, указывающих на явление резонанса. На рис. 6 б заметно значительное снижение резонансных пиков при использовании регулируемого резонансного контура.

Необходимо отметить, что при проектировании системы энергоснабжения и применении в ней как активных, так и пассивных и активно-пассивных фильтров как методов для компенсации токов гармоник необходимо учитывать возможность возникновения резонансных явлений, что предполагает использование дополнительной аппаратуры. Совместное применение индивидуальной фильтрации в одной системе энергоснабжения для каждой из нагрузок в отдельности или совместное использование методов индивидуальной и централизованной фильтрации для устранения искажений может привести к тому, что регулирование тока между различными фильтрами приведёт к их неправильной работе вследствие того, что один фильтр будет компенсировать потери на другом. Бесконтрольная установка активных фильтров компенсации высших гармоник не способна подавить весь спектр гармонических искажений. В современном мире пока ещё не существует фильтра, адаптированного под все электроэнергетические системы, поэтому производителям таких устройств приходится проектировать фильтры для каждой системы электроснабжения в отдельности.

Кроме того, в случае использования совместно с активными фильтрами дополнительных пассивных элементов или при использовании различной модификации этих элементов как средства повышения коэффициента мощности, при проектировании этих фильтров не учитывают явления аномальных всплесков напряжений, возникающих вследствие резонанса. В связи с этим

возникает необходимость создания нового устройства управляемого активно-резонансного типа, которое позволило бы повысить надёжность и качество передаваемой электроэнергии и, в большей степени, уменьшило влияние электромагнитной несовместимости нелинейных потребителей. При этом необходимо учитывать, что такое устройство должно обладать наименьшими массогабаритными показателями и иметь возможность автоматически подстраиваться под особенности различных систем энергоснабжения, как береговых, так и судовых автоматизированных электроэнергетических систем.

Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Изд-во Стандартиформ, 2014. — 20 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов: в 2 т. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2014. — 1315 с.
3. Маслович С. Ф. Математическое моделирование параметров надёжности и электропотребления / С. Ф. Маслович, В. Н. Галушко, С. В. Бахур // Проблемы физики, математики и техники. — 2014. — № 2 (19). — С. 77–83.
4. Потапов А. И. Контроль, диагностика, обеспечение качества электроэнергии / А. И. Потапов, А. А. Пугачёв, И. А. Потапов. — СПб.: Изд-во ДЕАН, 2014. — 840 с.
5. Гриб О. Г. Актуальные задачи определения долевого участия в ответственности за нарушение качества электрической энергии / О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, П. Г. Щербакова // Научные труды ДонНТУ. Серия: Электротехника и энергетика. — 2013. — № 1 (14). — С. 77–82.
6. Пат. 2514439 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/01. Устройство компенсации высших гармоник / В. Н. Мищеряков, Д. В. Безденежных, М. М. Хабибуллин, О. В. Мищерякова; Заявитель и патентообладатель Липецк. ФГБОУ ВПО ЛГТУ. — № 2012133840/07; Заявлено 07.08.2012; Оpubл. 27.04.2014 // Бюл. — 2014. — № 12.
7. Малафеев С. И. Теория автоматического управления: учебник для вузов / С. И. Малафеев, А. А. Малафеева. — М.: Академия, 2014. — 377 с.
8. Лебедев В. В. Активный вольтодобавочный компенсатор нелинейных искажений напряжения судовой сети: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Лебедев. — Н. Новгород: Нижегородский гос. тех. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2014. — 19 с.
9. Горева Т. С. Построение модели фильтрокомпенсирующего устройства импульсных и флуктуационных помех, возникающих в судовых системах электроснабжения, с идентификацией в ортогональном вейвлет-базисе / Т. С. Горева, С. Е. Кузнецов, Н. Н. Портнягин // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3. — С. 63 – 68.
10. Пат. 2508589 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/01, Н 02 Н 9/04. Система и способ для подавления резонанса / К. М. Зилер, Э. В. Ларсен, А. С. Ахиллес; Заявитель и патентообладатель СПб. Дженерал Электрик Компани. — № 2009141805/07; Заявлено 13.11.2010; Оpubл. 27.02.2014 // Бюл. — 2014. — № 6.
11. Аполлонский С. М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для вузов / С. М. Аполлонский. — СПб.: Лань, 2012. — 592 с.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.62:621.396

Ю. Н. Андрюшечкин,
канд. техн. наук, доц.;

В. В. Каретников,
д-р техн. наук; проф.;

А. П. Яснот,
асп.

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДСТВА НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ РОССИИ

ON THE QUESTION OF THE USE OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGY FOR NAVIGATION SAFETY ON INLAND RUSSIAN WATERWAYS

В статье рассматриваются вопросы, связанные с распространением радиоволн СВ-диапазона с учетом влияния подстилающей поверхности на примере действующей контрольно-корректирующей станции (ККС) «Шексна» и возможности передачи по каналам автоматической идентификационной системы (АИС) дифференциальной поправки глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Отмечается, что в отдельных случаях данная поправка может служить для компенсации незначительных разрывов дифференциальных полей СВ-диапазона. Представлены расчеты зоны действия исследуемой ККС «Шексна». На примере региона участка внутренних водных путей (ВВП) России «Белое озеро» показан вариант построения системы мониторинга средств навигационной ограждения (СМ СНО). В результате проведенного анализа результатов, сделан вывод о том, что для успешного функционирования СМ СНО для района ВВП «Белое озеро» достаточно оборудовать аппаратурой АИС лишь часть выставленных буев. В случае, если элемент СНО располагается вне зоны действия базовой станции (БС) АИС, целесообразно организовать передачу данных от объектов мониторинга «по цепи».

This article discusses questions related to the MF radio propagation range, taking into account the influence of the underlying surface on the example of the operating control and correction station «Sheksna» and the possibility of transmission differential correction of the global navigation satellite system (GNSS) in channels of the Automatic Identification System (AIS). In some cases, this differential correction can be used to compensate for minor breaks differential fields MF range. Presents the calculated coverage correction control station «Sheksna». On the example of the White Lake shows a variant of the construction of a monitoring system of aids to navigation for the area of inland waterways of Russia. After analyzing the results we can say that, for the successful functioning of the monitoring system for White Lake enough to equipped AIS equipment only part exposed buoys, if the buoy is out of range of the base station AIS is advisable to organize the transfer of data from monitoring sites «on the circuit».

Ключевые слова: система мониторинга плавучей навигационной обстановки, автоматическая идентификационная система (АИС), распространение радиоволн СВ диапазона, подстилающая поверхность, контрольно-корректирующая станция (ККС), безопасность судоходства.

Key words: Monitoring floating of navigational aids, Automatic Identification System (AIS), MF propagation range, correction station, the underlying surface, the safety of navigation.



ВЕЛИЧЕНИЕ интенсивности судоходства на внутренних водных путях (ВВП) приводит к необходимости обратить пристальное внимание на уровень безопасности судоходства. Суда, при плавании на ВВП, как правило, оснащены современным навигационным

оборудованием и средствами связи. При этом в большинстве районов береговая инфраструктура соответствует уровню оснащенности судов.

Внедрение современных инфокоммуникационных технологий на ВВП РФ, таких как автоматизированная идентификационная система (АИС), позволяет повысить уровень безопасности судоходства при увеличении интенсивности грузопассажирских перевозок. В этом случае весьма остро стоит вопрос определения зоны действия такой системы с учетом воздействия взаимных помех, окружающего рельефа и взаимного перемещения транспондеров относительно базовых станций (БС) [1].

Передаваемые по каналам АИС дифференциальные поправки ГНСС позволяют повысить эксплуатационные характеристики и качество мониторинга на ВВП. Необходимо отметить, что дифференциальная поправка, передаваемая в информационном канале АИС весьма актуальна для построения системы мониторинга средств навигационного ограждения (СМ СНО). В отдельных случаях для компенсации незначительных разрывов дифференциальных полей СВ-диапазона может быть использована поправка, передаваемая в канале АИС. Однако здесь необходимо помнить, что возраст дифференциальных поправок, передаваемых в канале АИС, несколько выше, чем в канале СВ-диапазона [2].

Процесс распространения поверхностных радиоволн СВ-диапазона над почвой зависит от ее физико-химических свойств [3], [4]. К таким свойствам, в первую очередь, относятся проводимость σ , сим/м, и диэлектрическая проницаемость ε . Свойства проводимости подстилающей поверхности в основном определяются ее составом, а также количеством растворов солей, содержащихся в почве и воде. Влияние подстилающей поверхности на процесс распространения поверхностных волн СВ-диапазона можно учесть с помощью нелинейного множителя ослабления $|W|$ [3], определяемого для однородной подстилающей поверхности в виде

$$|W| = 0,96 \cdot 10^{-5} \frac{\lambda^2 \sigma}{D}, \quad (1)$$

где λ — длина волны; D — удаленность от передатчика.

Для полноты исследования влияния свойств подстилающей поверхности на дальность передачи корректирующей информации определим зависимость вертикальной составляющей напряженности [5] электромагнитного поля. Для решения этой задачи можно использовать следующее соотношение:

$$|E| = \frac{3 \cdot 10^5 \sqrt{P}}{D} |W|, \quad (2)$$

где P — мощность передатчика.

Аппроксимирующие модели позволяют определять непосредственно дальность распространения радиоволны в зависимости от реальных характеристик используемой приемопередающей аппаратуры и электромагнитных параметров мультикомпозиционной подстилающей поверхности, над которой происходит распространение радиосигнала. Конечным результатом вычислений является дальность распространения радиосигнала — один из основных критериев на первичных этапах инженерного проектирования контрольно-корректирующей станции (ККС).

Алгоритм определения зоны действия передатчика в СВ-диапазоне при распространении радиосигнала земной волной может быть представлен решением трансцендентного уравнения для произвольной подстилающей поверхности:

$$B_e = \frac{r_c}{|W|}. \quad (3)$$

Здесь r_c — удаленность от передатчика; $|W|$ — нелинейный множитель ослабления; B_e или $B_e^{\text{зад}}$ — энергопотенциал радиосистемы.

Энергопотенциал радиосистемы определяется согласно выражению

$$B_e = \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{P_{\text{пер}}}{\alpha \cdot P_{\text{пр min}}} D_{\text{пр}} D_{\text{пер}}}, \quad (4)$$

где λ — длина волны; $P_{\text{пр min}}$ — чувствительность приемника; α — коэффициент, определяющий требуемую вероятность приема.

Применение энергопотенциала радиосистемы для определения дальности действия ККС впервые было предложено профессором А. А. Сикаревым. Эта величина является условием, напрямую зависящим от параметров конкретного приемопередающего оборудования. Ее использование в дальнейшем позволит определить пороговое значение вертикальной составляющей напряженности электромагнитного поля волны и, таким образом, установить дальность действия радиостанции с учетом параметров приемопередающего оборудования. Изменяя параметры оборудования в большую или меньшую сторону, логично будет ожидать увеличения или уменьшения зоны уверенного приема радиосигнала [2], [5], [6]:

$$D_{\text{пр}} = G_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{пр}}, \quad (5)$$

$$D_{\text{пер}} = G_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}}, \quad (6)$$

где $G_{\text{пр}}$ и $G_{\text{пер}}$ — коэффициент усиления, соответственно, приемной и передающей антенн; $\eta_{\text{пр}}$ и $\eta_{\text{пер}}$ — КПД их антенно-фидерного тракта.

В качестве примера рассмотрим ККС «Шексна». Подстилающая поверхность в районе установки указанной ККС достаточно разнообразна. Максимальное количество участков с однородной подстилающей поверхностью наблюдается в южном и северо-западном азимутальных направлениях. На рис. 1 приведена расчетная зона действия рассматриваемой ККС, имеющая форму, близкую к эллиптической с большой полуосью с северо-запада на юг.

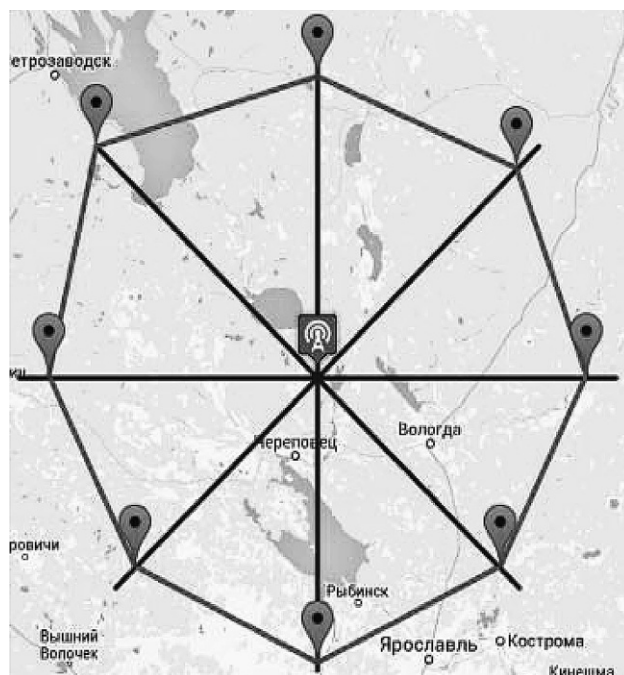


Рис. 1. Периметр зоны действия ККС «Шексна»

Принимая сделанные допущения, дальность передачи дифференциальной поправки будет составлять 249 км. Такая дальность действия доступна на северо-западном азимутальном направлении. Вероятно, это можно объяснить прохождением радиотрассы над водной поверхностью. Подобный эффект наблюдается на южном азимутальном направлении. Здесь дальность несколько меньше и составляет 243 км. На остальных азимутальных направлениях дифференциальное

поле практически равномерно, его дальность составляет около 223 км. Также можно отметить, что здесь проводимость концевых участков несколько ниже, чем в средней части.

Расчетные дальности действия ККС «Шексна» в зависимости от направления приведены в следующей таблице:

Номер п/п.	Название ККС	Координаты ККС	С, км	В, км	Ю, км	З, км	СВ, км	ЮВ, км	ЮЗ, км	СЗ, км
1	«Шексна»	59°46,0' N 38°14,0' E	223	223	243	223	223	223	223	249

Речная система мониторинга СНО (СМ СНО) может быть реализована на основе инфокоммуникационных каналов систем, работающих в различных частотных диапазонах. В качестве таких систем в зависимости от расположения элементов СНО могут использоваться системы сотовой связи, например, стандарта GSM. Однако в некоторых случаях весьма конструктивными могут быть системы спутниковой связи, такие как Инмарсат, Глобалстар или Иридиум [7].

В речных СМ СНО, функционирующих на основе стандарта GSM, связь объектов мониторинга с пунктом контроля и управления осуществляется по открытому каналу операторов сотовой связи. Очевидным недостатком такой СМ СНО является необходимость расположения объекта мониторинга в зоне действия существующих базовых станций (БС) стандарта связи GSM.

Реализация речных СМ СНО на базе спутникового канала связи основана на использовании сервиса передачи коротких сообщений по существующим коммерческим спутниковым системам общего доступа. Эти сообщения формируются абонентским оборудованием (терминалом) и содержат информацию о состоянии объекта мониторинга. Далее они передаются по спутниковой линии связи в центр управления. Речные СМ СНО на базе спутникового канала широко применяются в районах с низко развитой инфраструктурой, не обеспеченных связью стандарта подобного GSM.

Следует отметить, что вполне успешно для мониторинга СНО может применяться автоматизированная идентификационная система (АИС). Речная СМ СНО, строящаяся на основе каналов связи АИС, может быть реализована трех типов [7], [8].

Тип 1. Оборудование СМ СНО работает только на передачу, используя протокол F4TDMА. Отсюда следует, что временные слоты для такого оборудования должны быть зарезервированы. Это наиболее простая версия, с минимальным энергопотреблением.

Тип 2. Оборудование подобно типу 1, но дополнительно оснащено приемником с ограниченными возможностями. Это позволяет получать сообщения из центра управления и осуществлять удаленную настройку оборудования со стороны центра управления.

Тип 3. Оборудование состоит из двух транспондеров, что позволяет осуществлять полноценное управление по каналу VDL АИС. Здесь, кроме режима F4TDMА, возможна реализация режима R4TDMА, где предварительное резервирование временных слотов не требуется. В данном случае возможна функция ретрансляции АИС-сообщений, что, несомненно, расширяет функциональные возможности цепи СНО-АИС.

Общие принципы построения таких систем заключаются в обеспечении надежного перекрытия зон действия всех элементов СМ СНО с последующим объединением их в общую сеть, что позволяет обеспечить квазинадежное покрытие акваторий СМ СНО.

В ряде случаев транспондер АИС может быть использован для транзитной передачи с целью увеличения её зоны. По существу, он функционирует как ретранслятор, но не имеет доступа к наземной линии. Такие ретрансляторы могут также быть установлены на удаленных островах вдали от берега для расширения зоны обслуживания береговой БС.

Следует отметить, что некоторые специалисты выражают обеспокоенность тем, что пропускная способность каналов АИС вскоре может оказаться недостаточной с учетом реальной и перспективной интенсивности судоходства, а также возможностью установки оборудования АИС на элементах СНО, маломерных и прогулочных судах и др. Реальная пропускная способ-

ность канала связи АИС [4], [9], [10] должна рассчитываться с учетом особенностей того района, где предполагается внедрение и развертывание системы.



Рис. 2. Структура СМ СНО на примере Белого озера

Рассмотрим вариант построения СМ СНО на примере Белого озера — рис. 2. Как было показано в [8], [11], радиус действия БС АИС при высоте антенны 30 м и буй с высотой антенны 4 м составляет 30 км, а радиус действия транспондеров элементов СНО в случае передачи данных мониторинга между буйами с высотой антенны будет равен 10 км. Проанализировав полученные результаты и структуру СМ СНО для Белого озера, можно сделать вывод о том, что при данной расстановке буйев нет необходимости оборудовать аппаратурой АИС каждый буй, для достижения заданной цели достаточно оборудовать не менее пяти буйев. Также следует отметить, что несколько буйев могут находиться вне зоны действия БС АИС. В таком случае целесообразно организовать передачу данных от объектов мониторинга «по цепи».

Список литературы

1. Каретников В. В. Современные инфокоммуникационные технологии внутреннего водного транспорта России / В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Речной транспорт (XXI век). — 2010. — № 1 (43). — С. 65–68.
2. Каретников В. В. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — Изд. 2-е. — СПб.: ГУМРФ, 2013. — 525 с.
3. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / Е. Л. Фейнберг. — Изд. 2-е. — М.: Наука, Физматлит, 1999. — 496 с.
4. Петухов Ю. В. Электромагнитная защищенность базовых станций речных автоматизированных информационных систем в условиях взаимных помех / Ю. В. Петухов, И. А. Сикарев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2008. — № 2. — С. 97–100.
5. Андрияшечкин Ю. Н. Особенности влияния подстилающей поверхности на дальность передачи корректирующей информации / Ю. Н. Андрияшечкин, В. В. Каретников // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2011. — № 1. — С. 74–77.

6. Сикарев А. А. Оптимальный прием дискретных сообщений / А. А. Сикарев, А. И. Фалько. — М.: Связь, 1978. — 328 с.

7. Каретников В. В. Система мониторинга плавучей навигационной обстановки на внутренних водных путях России // В. В. Каретников, А. А. Сикарев, Г. Б. Чистяков [и др.] // Морская радиоэлектроника. — 2013. — № 3 (45). — С. 34–35.

8. Волков Р. В. К вопросу определения зоны действия системы мониторинга средств навигационного ограждения / Р. В. Волков, В. В. Каретников, А. П. Яснов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 24–27.

9. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений / Л. М. Финк. — Изд. 2-е. — М.: Сов. радио, 1970. — 728 с.

10. Каретников В. В. Совершенствование систем управления судами с использованием автоматизированных идентификационных систем на внутренних водных путях / В. В. Каретников, И. А. Сикарев // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 3. — С. 93–96.

11. Волков А. Б. Алгоритмы определения дальности и радиуса зоны действия автоматической информационной системы, работающей в условиях сложной помеховой обстановки / А. Б. Волков, В. В. Каретников, И. А. Сикарев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2009. — № 10. — С. 62–64.

УДК 004.056.5

М. Р. Бухарметов,
асп.;

Э. П. Теплов,
д-р полит. наук, проф.

ЗАЩИТА ГРАФИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ ПУТЕМ ВСТРАИВАНИЯ ПОЛУХРУПКИХ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯЦИИ ЯРКОСТИ

GRAPHIC DOCUMENTS PROTECTION BY EMBEDDING A DIGITAL WATERMARK BASED BRIGHTNESS MODULATION

В статье описывается робастный метод защиты графических документов на основе алгоритма модуляции яркости. Защита осуществляется путем встраивания цифрового водяного знака в исходное незащищенное изображение. Приведенный алгоритм позволяет одновременно обеспечивать скрытое встраивание произвольной информационной последовательности заданного объема и аутентификацию графического документа. Данный метод устойчив к геометрическим атакам на стегоконтейнер, таким как кадрирование, повороты, кратные 90°, частичное удаление информации из области изображения-контейнера. Дублирование встраиваемой скрытой информации на основе псевдослучайного распределения блоков графического документа усиливает защиту цифрового водяного знака от внешних геометрических воздействий на стегоконтейнер. В то же время поблочная проверка информационной последовательности путем нахождения одинаковых элементов ключа позволяет выявлять возможные области модификации изображения.

This article describes a robust method of protection of graphic documents based on the brightness modulation algorithm. Protection is carried out by inserting the digital watermark in the original unprotected images. The algorithm allows to simultaneously provide covert insertion of an arbitrary sequence of a given volume of information and graphic document authentication. This method is resistant to geometric attacks on stegocontainer, such as cropping, rotation, multiples of 90 degrees, the partial removal of information from the image container. Duplicating of embeddable hidden information, on the basis of pseudorandom distribution of units of the graphic document, strengthens protection of digital watermark against external geometrical influences on a stegocontainer. At the same time block-check of information sequence, by finding of identical elements of a key, allows to reveal possible areas of modification of the image.

Ключевые слова: защита информации, стеганография, цифровой водяной знак, модуляция яркости.
Key words: information security, steganography, digital watermark, intensity modulation.

Введение

Огромное количество электронных документов, циркулирующих в компьютерных сетях, является основанием для постановки важной задачи защиты информации, хранящейся в данных документах. Необходимо обеспечить защиту документов от несанкционированного доступа или от преднамеренных искажений сообщений [1]. Задача надежной защиты авторских прав, прав интеллектуальной собственности и других конфиденциальных данных от несанкционированного доступа является одной из важнейших и не до конца решенных до настоящего времени проблем.

В соответствии со ст. 23 Конституции РФ, каждый имеет право на неприкосновенность частной жизни, личную и семейную тайну, защиту своей чести и доброго имени. Совокупность правовых норм, закрепленных в главе 14 Трудового кодекса РФ, впервые регулирует отношения по сбору, обработке, хранению, использованию и передаче персональных данных работника. Информация, относящаяся к коммерческой тайне, имеет особую материальную ценность для организаций. Отношения, связанные с отнесением информации к коммерческой тайне, передачей такой информации и охраной ее конфиденциальности регулирует вступившая в силу с 01 января 2008 г. ч. IV ГК РФ и ФЗ от 29.07.2004 № 98-ФЗ «О коммерческой тайне».

Водный транспорт, напрямую зависящий от наличия безопасных средств управления, систем навигации и связи, обязан оказывать повышенное внимание в отрасли технологическому обновлению, внедрению высокопроизводительных систем автоматизации, применению инновационных технологий [2]. Для хранения и передачи такого огромного количества информации нужны соответствующие системы автоматизации, позволяющие обезопасить всю процедуру обработки документов различного рода. Тем самым развитие информационных технологий в транспортных компаниях и, в частности, на судах напрямую связано с построением систем обработки информации [3], [4].

Предметом данной статьи является разработка и исследование алгоритма внедрения цифрового водяного знака (ЦВЗ) на основе модуляции яркости блоков графических документов, позволяющего одновременно обеспечивать скрытое встраивание произвольной информационной последовательности заданного объема и аутентификацию изображения, в которое был встроен ЦВЗ.

Основная часть

В качестве контейнеров передачи скрытой информации могут выступать различные оцифрованные данные: растровые графические изображения, звук, видео, всевозможные носители цифровой информации, а также текстовые и другие электронные документы. Наиболее распространенными типами контейнеров в компьютерной стеганографии на данный момент являются изображения и аудиоданные, представленные в цифровой форме, а также видеопоследовательности, т. е. мультимедиа-контейнеры [5]. Это объясняется тем, что подобные контейнеры уже по технологии получения имеют шумовую составляющую, которая маскирует встраиваемое сообщение.

Довольно большой процент современных систем компьютерной стеганографии использует в качестве контейнеров растровые графические изображения различных форматов. Наиболее широкое распространение в последнее время получил формат JPEG [6], [7], в котором практически все современные цифровые фотоаппараты и видеокамеры сохраняют изображения (большинство фотографических изображений опубликованы в сети интернет именно в нем). В том случае, когда формат хранения растровых изображений использует сжатие данных, значительно возрастает сложность разработки стеганографической системы, так как, во-первых, увеличивается сложность анализа формата, а во-вторых, изменения, вносимые стеганографической системой в данные изображения, приводят к нежелательному ухудшению эффективности сжатия [8]. В случае, когда формат графических изображений использует сжатие с потерями информации, классические ме-

тоды сокрытия в графических изображениях, как правило, становятся малоэффективными, так как при потере информации происходит уничтожение скрытой информации, в силу малой амплитуды сокрытого сигнала. Для повышения робастности вложения встроенных ЦВЗ к сжатию графических документов в стегаалгоритмах необходимо применять те же преобразования, что и в алгоритмах сжатия этих файлов.

Важнейшей особенностью формата JPEG является использование алгоритма сжатия информации с потерями. Это означает, что при сжатии файла часть информации уничтожается, но изменения незначительно влияют на файл, и они малозаметны. Формат JPEG предназначен, в первую очередь, для изображений с плавными цветовыми переходами и градиентами, таких как обычные цифровые фотографии. Благодаря этому фактору именно данный тип графических документов имеет такой успех среди большого количества передаваемой информации.

Необходимо проверить, насколько зависимы два соседних пикселя. Проверим это для всех пар пикселей изображения. Отметим их на координатной плоскости точками так, что координата точки по оси абсцисс — значение первого пикселя, по оси ординат — второго. Для изображения размером 256×256 получим 32768 точек (рис. 1).

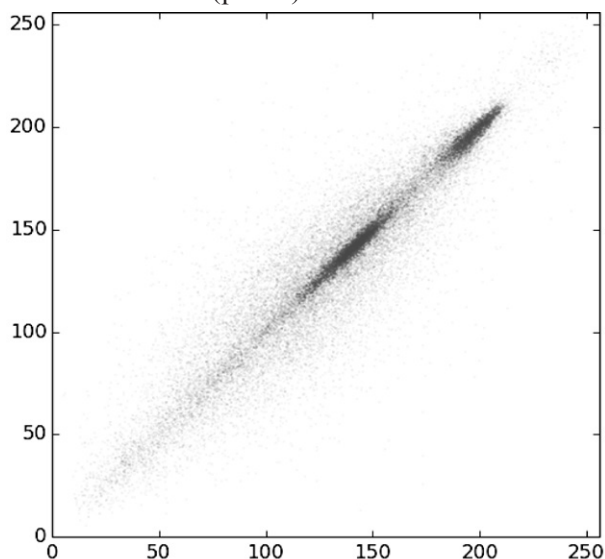


Рис. 1. Зависимость пар соседних пикселей

Каков бы ни был алгоритм сжатия информации, его принцип всегда один — нахождение и описание закономерностей. Чем больше закономерностей, тем больше избыточности, тем меньше информации [9]. Архиваторы и кодеры обычно приспособлены под конкретный тип информации, и знают, где можно их найти. В некоторых случаях закономерность видна сразу, например, картина голубого неба. Каждый ряд его цифрового представления можно довольно точно описать прямой [10].

На первом этапе при сжатии изображения форматом JPEG происходит преобразование из цветового пространства RGB , широко используемого в компьютерной графике, в пространство $YCbCr$, основанное на характеристиках яркости и цветности. Применение данного пространства вместо привычного и легкого для понимания RGB объясняется физиологическим строением человеческого глаза, а именно нервной системой человеческого зрения, которая обладает гораздо большей чувствительностью к яркости нежели к цветоразностным составляющим. Буква Y в таких цветовых пространствах обозначает компонент *светимость*, которая вычисляется как взвешенное усреднение компонентов R , G и B по следующей формуле:

$$Y = k_r R + k_g G + k_b B,$$

где k — соответствующий весовой множитель.

Остальные цветовые компоненты, по существу, определяются в виде разностей между светимостью Y и компонентами R , G и B :

$$C_b = B - Y;$$

$$C_r = R - Y;$$

$$C_g = G - Y;$$

При этом получаются четыре компонента нового пространства вместо трех RGB . Однако число $C_b + C_r + C_g$ является постоянным, поэтому только два из трех хроматических компонентов необходимо хранить, а третий можно вычислять на основе двух других. Чаще всего в качестве двух искоемых цветовых компонентов используют C_b и C_r . Преимущество пространства YC_bC_r по сравнению с RGB заключается в том, что C_b и C_r можно представлять с меньшим разрешением, чем Y , так как глаз человека менее чувствителен к цвету предметов, чем к их яркости. Это позволяет сократить объем информации, необходимой для представления хроматических компонентов, без заметного ухудшения качества передачи цветовых оттенков изображения. Такой подход к преобразованию цветового пространства дает дополнительный эффект при сжатии цветных изображений. При этом алгоритмы сжатия сначала преобразуют исходное цветовое пространство из RGB в YC_bC_r , сжимают его, а затем при восстановлении обратно преобразуют изображение в цветовое пространство RGB , так как оно используется в ЭВМ. Формулы для прямого и обратного преобразований выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Y &= k_r R + (1 - k_b - k_r) G + k_b B; \\ C_b &= \frac{0,5}{1 - k_b} (B - Y); \\ C_r &= \frac{0,5}{1 - k_r} (R - Y). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} R &= Y + \frac{1 - k_r}{0,5} C_r; \\ G &= Y - \frac{2k_b(1 - k_b)}{1 - k_b - k_r} C_b - \frac{2k_r(1 - k_r)}{1 - k_b - k_r} C_r; \\ B &= Y + \frac{1 - k_b}{0,5} C_b. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На втором этапе яркостный компонент Y и отвечающие за цвет компоненты C_b и C_r разбиваются на блоки 8×8 пикселей и отдельно для каждого компонента цветового пространства YC_bC_r осуществляется прямое дискретно-косинусное преобразование:

$$DCT(i, j) = \frac{1}{\sqrt{2N}} C(i) C(j) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} p(x, y) \cos \left[\frac{(2x+1)i\pi}{2N} \right] \cos \left[\frac{(2y+1)j\pi}{2N} \right];$$

$$C(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & x = 0; \\ 1, & x > 0. \end{cases}$$

Цель этого преобразования заключается в переходе от пространственного представления изображения к спектральному (пространству частот изменения яркости и оттенка). Именно на данном этапе большинство алгоритмов внедряет ЦВЗ в графический документ. Если не переходить к данному этапу, а воспользоваться зависимостью значений яркости близлежащих блоков пикселей, то можно сделать вывод, что поскольку яркостный компонент подвергается меньшим изменениям, то можно производить встраивание информации именно в данный параметр.

Предлагаемый метод основан на широко известном методе QIM (*Quantization Index Modulation*) с использованием модуляции яркости пикселей изображения [11]. Пусть даны исход-

ное изображение $I(n, m)$ и бинарное изображение ЦВЗ $W(n, m)$, где $n \in [1, N]$; $m \in [1, M]$. Предлагаемый в данной работе алгоритм предполагает встраивание ЦВЗ по следующему правилу:

$$\begin{aligned} & \text{При } W(n, m) = 1: \\ & \quad \text{если } I(n, m) > I(n, m+1), \text{ тогда } I'(n, m) = I(n, m), \\ & \quad \text{иначе } I'(n, m) = I(n, m) + P. \\ & \text{При } W(n, m) = 0: \\ & \quad \text{если } I(n, m) < I(n, m+1), \text{ тогда } I'(n, m) = I(n, m), \\ & \quad \text{иначе } I'(n, m) = I(n, m) - P. \end{aligned}$$

Здесь P — минимальный уровень аддитивного сигнала, позволяющий изменить яркость пикселя настолько, чтобы алгоритм сжатия не только смог его пережать, но и внешне был незаметен человеческому глазу.

Так как алгоритм сжатия JPEG работает поблочно, перераспределение яркости необходимо производить на участках блоков размером 8×8 пикселей, иначе вся модуляция яркости, выполненная на данном этапе, при квантовании JPEG будет нарушена.

Третий этап алгоритма является основным. Именно здесь происходит внедрение ЦВЗ в контейнер изображения при помощи перераспределения яркости внутри блоков по всему полю изображения. Работает это следующим образом. Все цифровое изображение ЦВЗ является черно-белым (бинарным), соответственно можно провести аналогию и задать для белого цвета бит, равный «0», а для черного — «1». Предположим, что существует необходимость внедрить в графический цифровой файл бит, равный «0». Для этого необходимо вначале в изображении-исходнике выполнить расчет разности показателей яркости блоков пикселей. Для удобства рассмотрим случай без использования хэш-функций псевдослучайного распределения блоков и будем строить последовательности блоков по их следованию в изображении. Для вычисления значения яркости будем использовать следующую формулу:

$$Y = 0,3R + 0,59G + 0,11B,$$

где R, G, B — значения красного, зеленого и синего цветов соответственно.

Возьмем два соседних блока 8×8 пикселей оцифрованного изображения и рассчитаем средний показатель яркости для каждого из них.

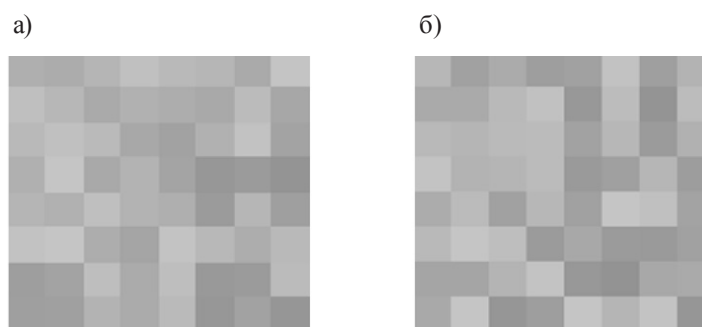


Рис. 2. Средние показатели яркости двух соседних блоков:
а — $Y = 162.978$; б — $Y = 161.468$

Для внедрения бита со значением «0» необходимо, чтобы первый блок имел усредненное значение яркости меньше, чем второй. Здесь необходимо произвести перераспределение яркости.

Для модуляции яркости воспользуемся равномерным законом распределения вероятностей:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ 0, & x < a, x > b. \end{cases}$$

Последним этапом сокрытия ЦВЗ является псевдослучайное распределение разностных блоков 8×8 , т.е. не прямолинейное движение слева-направо между соседними блоками, а вычисление разности между блоками, находящимися в случайных позициях изображения. Этого можно добиться, используя специальный ключ — хеш-функцию, генерируемую на основе пароля, вводимого отправителем. Таким образом, алгоритм кодирования приобретает следующий вид:

- 1 — генерирование хеш-функции на основе пароля;
- 2 — разбиение входного изображения на блоки размером 8×8 пикселей;
- 3 — вычисление разницы между блоками, определенными хеш-функцией;
- 4 — перераспределение яркости внутри блока.

Для декодирования используются те же самые операции, выполненные в обратную сторону, с некоторыми дополнениями:

- 1 — генерирование хеш-функции на основе пароля;
- 2 — разбиение входного изображения на блоки размером 8×8 пикселей;
- 3 — вычисление разницы между блоками, определенными хеш-функцией;
- 4 — построение фрагментов ЦВЗ;
- 5 — извлечение и восстановление ЦВЗ путем сложения всех фрагментов.

Если изображение потеряло часть информации или в него были внесены модификации, то ЦВЗ при извлечении подвергается процедуре восстановления, исследуя поблочно всё изображение и находя одинаковые элементы ключа [12]. Таким образом, модификация одного или нескольких блоков изображения-контейнера приводит к потере только соответствующих бит (пикселей), не оказывая влияния на извлечение других бит для восстановления ЦВЗ. Это означает, что ЦВЗ не только будет восстановлен, но и будут обнаружены места нарушения внедрения ЦВЗ, а следовательно, модификации изображения [13].

В качестве иллюстрации предложенного алгоритма и его свойств встроим в изображение-контейнер ЦВЗ размером 25×10 пикселей, после чего подвергнем изображение с внедренным ЦВЗ ряду геометрических атак и сжатию форматом JPEG (рис. 3). Из-за кадрирования произошло смещение границ блоков встраивания, вследствие чего произошел сдвиг ЦВЗ. Также цифровой знак потерял 10 % информации, при том, что оригинал изображения-контейнера потерял порядка 40 %. При таких колоссальных модификациях изображения цифровой знак остался хорошо читаемым, а также показал возможные варианты модифицированных областей. Данные результаты показывают, что ЦВЗ, встроенный с использованием разработанного алгоритма, обладает устойчивостью к набору геометрических преобразований изображения-контейнера, а также сжатию форматом JPEG.

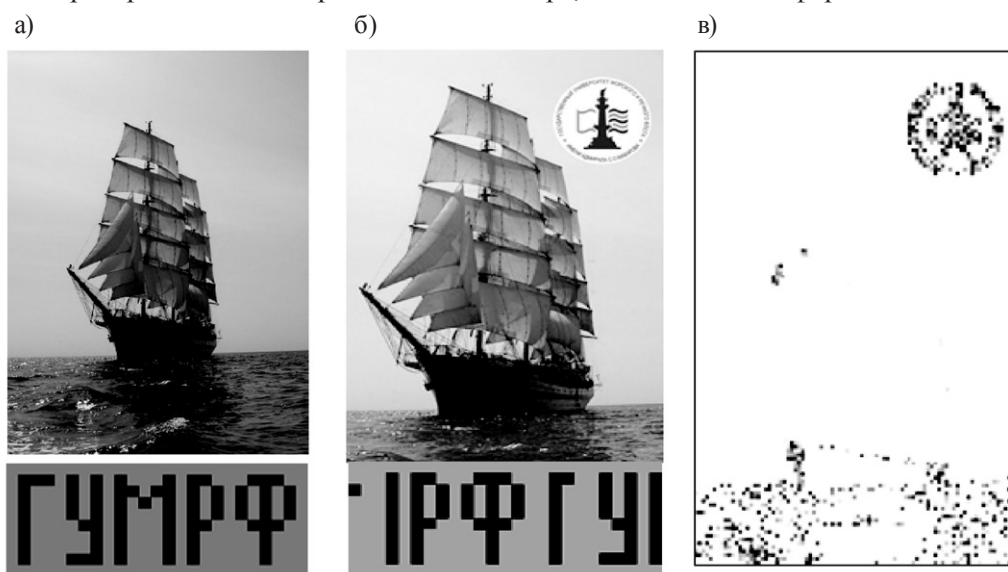


Рис. 3. Результат извлечения ЦВЗ из модифицированного изображения:

- а — изображение-контейнер и встраиваемый ЦВЗ;
- б — модифицированное изображение и извлеченный ЦВЗ;
- в — области модификации изображения-контейнера

Заключение

В настоящей работе представлен новый алгоритм поблочного встраивания ЦВЗ, обладающий следующими преимуществами по сравнению с существующими методами.

1. Алгоритм позволяет одновременно встраивать произвольный ЦВЗ в изображение-контейнер и обеспечивать проверку поблочной подлинности изображения.

2. Алгоритм обеспечивает устойчивость ЦВЗ к преобразованиям кадрирования, линейного контрастирования, замене произвольных фрагментов изображения.

3. Алгоритм не требует использования дополнительных процедур предобработки (в частности, шифрования) изображения ЦВЗ.

4. Алгоритм не требует использования фиксированного ЦВЗ для обнаружения модификаций, что обеспечивает стойкость ЦВЗ к так называемым «атакам с фиксированным ЦВЗ» (watermarktemplateattack, преднамеренная атака осведомлённого нарушителя, позволяющая скрывать модификации изображения даже при наличии встроенного ЦВЗ).

5. Алгоритм работает быстрее за счет использования модуляции яркости, а не расчета матриц дискретно косинусного преобразования.

Использование перераспределения яркости в качестве основы сокрытия информации дает неограниченные возможности по улучшению алгоритма. Возможно использование различных алгоритмов распределения яркости внутри блоков для более плотного внедрения битов ЦВЗ, коррекция границ участков блоков с ярко выраженным перераспределением яркости. Также можно добавить процедуру восстановления ЦВЗ для изображений, повернутых на угол, кратный 90°.

Список литературы

1. *Сабанов А.* Некоторые аспекты защиты электронного документооборота / А. Сабанов // Connect. Мир связи. — 2010. — № 7. — С. 62–64.
2. *Каторин Ю. Ф.* Защищенность информации в каналах передачи данных в береговых сетях автоматизированной идентификационной системы / Ю. Ф. Каторин, В. В. Коротков, А. П. Нырков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 98–102.
3. *Лубенец А.* Пути повышения эффективности документооборота на транспорте / А. Лубенец // Автоматизация транспортной отрасли. — 2010. — № 4. — С. 18–19.
4. *Нырков А. П.* Безопасность данных протокола SOAP в системах управления движением судов / А. П. Нырков, Д. С. Власов // X Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика — 2006» (РИ-2006): тр. конф. — СПб.: СПОИСУ, 2007. — С. 210–213.
5. *Шмаев В. Б.* Современная стеганография. Принципы, основные носители и методы противодействия / В. Б. Шмаев // Эссе по курсу «Защита информации». — 2010. — С. 1–3.
6. *Шилихина В. А.* Модель обеспечения целостности при преобразованиях стеганоконтейнера с потерями / В. А. Шилихина, А. В. Никишова // Материалы второй всероссийской науч.-практ. конф. — Волгоград, 2013. — С. 50–51.
7. *Конахович Г. Ф.* Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г. Ф. Конахович, А. Ю. Пузыренко. — М.: МК-Пресс, 2006. — 288 с.
8. *Миано Дж.* Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии / Дж. Миано. — М.: ТРИУМФ, 2005. — 330 с.
9. *Кустов В. Н.* Методы встраивания скрытых сообщений / В. Н. Кустов, А. А. Федчук // Защита информации. Конфидент. — 2010. — № 3. — С. 34–41.
10. *Барсуков В. С.* Стеганографические технологии защиты документов, авторских прав и информации / В. С. Барсуков // Обзор специальной техники. — 2009. — № 2. — С. 31–40.

11. Глумов Н. И. Алгоритм встраивания полухрупких цифровых водяных знаков для задач аутентификации изображений и скрытой передачи информации / Н. И. Глумов, В. А. Митекин // Компьютерная оптика. — 2011. — Т. 35. — № 2. — С. 262–264.
12. Бухарметов М. Р. Использование нейронных сетей для безопасного электронного документооборота на транспорте / М. Р. Бухарметов // Сб. работ междунар. науч.-практ. конф. «Информационные управляющие системы и технологии». — Одесса, 2014. — С. 167–169.
13. Бухарметов М. Р. Методы обеспечения защищенного документооборота в транспортной сфере / М. Р. Бухарметов // Сб. «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2013)». — СПб., 2013. — С. 87–88.

УДК 004.042, 004.942, 681.3.07

Б. Н. Попов,
канд. техн. наук, доц.;

Е. С. Федорина,
асп.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ К ИНФОРМАЦИОННЫМ ПОТОКАМ ОБЪЕКТОВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

USING OF METHODS FOR ANALYSIS AND PROCESSING DATA TO AN INFORMATION FLOWS FOR OBJECTS OF WATER TRANSPORT

Статья посвящена вопросам анализа и обработки потоков данных в информационных системах объектов водного транспорта. Рассмотрено понятие информационного потока для сложных данных водотранспортной отрасли. В качестве методов анализа и обработки информационного потока выбраны нелинейное вейвлет-преобразование (НВП) и дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Приведены формулы для НВП и ДПФ, описана главная идея НВП для сигналов, представляющих информационный поток. Смоделированы различные виды сигналов, представляющие необработанные информационные потоки. Для этих сигналов проведено НВП в пакете Wavelet Toolbox системы MATLAB. Результаты НВП приведены в графическом виде. Применено ДПФ к зашумленному сигналу, представлен график спектральной плотности этого сигнала. Приведены выводы по проделанной работе.

The article is developed to questions of analysis and processing of data flows in information systems for objects water transport. The concept of information flow is considered for complex data of a water-transport branch. Continuous Wavelet conversion and discrete Fourier conversion are chosen as methods of analysis and processing of information flows. Continuous Wavelet conversion and discrete Fourier conversion are given and the main idea of Wavelet conversion is described for signals representing information flows. Different view of signals representing untreated information flows. Continuous Wavelet conversion is conducted for these signals in Wavelet Toolbox package of MATLAB system. Results of Wavelet conversion are given in the graphic view. Discrete Fourier conversion is applied to the noisy signal; the graph of the spectral density is represented of the signal. The conclusions are given by made the work.

Ключевые слова: информационный поток, непрерывное вейвлет-преобразование, дискретное преобразование Фурье, скейлограмма, пакет Wavelet Toolbox системы MATLAB.

Key words: information flow, continuous Wavelet conversion, discrete Fourier conversion, skeylogramma, Wavelet Toolbox package of MATLAB system



В СОВРЕМЕННОМ мире информационные системы (ИС) находят применение в самых различных сферах деятельности общества, в том числе — на объектах водного транспорта (ОВТ) [1], [2]. Для ОВТ характерны распределенные ИС [3], их компоненты представ-

ляют собой различные объекты — как подвижные, так и с фиксированным положением [4]. Также для ОВТ стали применяться Web-сервисы информационных систем, и теперь пользователь такого сервиса может просматривать, редактировать и анализировать данные об объектах водного транспорта с помощью Web-браузеров [5]. Также для ОВТ применяются геоинформационные системы (ГИС), в частности Web-ГИС [6], [7].

Данные в ИС для ОВТ представляют собой сложные объекты, имеющие смешанную структуру. Например, «семантические» (атрибутивные) данные об ОВТ могут быть описаны реляционной моделью, а для организации пространственных данных об ОВТ эта модель не подходит. Таким образом, в ИС для объектов водного транспорта используют сложные модели организации данных, в частности геореляционную модель [8]. При работе со «сложной» информацией, циркулирующей по ИС, на объектах водного транспорта целесообразно подразделять все данные на информационные потоки [4], [6], [9] – [11]. Классическое определение информационного потока (ИП) дано в [9] – [11]. Д-р техн. наук, проф. Д. В. Ландэ дает определение ИП как процессу, реализуемому неубывающей ступенчатой и всегда целочисленной функцией правого конца рассматриваемого временного отрезка. Это определение было дано применительно к Web-пространству (для ранжирования ссылок, поиска ключевых слов и частоты их упоминания в сети Интернет). В связи со сложностью данных (звуковые и текстовые данные с шумом, размытые видеоданные местности и др.), передаваемых в ИС воднотранспортной отрасли ИП будем считать функциональную зависимость между количеством появившихся данных и определенными моментами времени.

Анализ и прогнозирование «поведения» сложных данных воднотранспортной отрасли являются актуальными проблемами на сегодняшний день. Существует большое количество методов анализа данных. Мы рассмотрим методы НВП и ДПФ. Применение этих методов актуально для выявления особенностей (цикличности, скачков, разрывов) данных в общем потоке.

Проведем анализ ИП с помощью НВП. НВП представляет собой особый тип линейного преобразования, базисные функции которого имеют специфические свойства. Базисные функции вейвлет-преобразования называются вейвлетами, а также «малыми волнами». Вейвлет представляет собой некоторую функцию, сосредоточенную в небольшой окрестности некоторой точки и резко убывающую к нулю по мере удаления от этой точки, как во временной, так и в частотной области [10]. Вейвлеты представлены в виде коротких волновых пакетов с нулевым интегральным значением. К вейвлетам применимы операции сдвига (перемещения области локализации вейвлета во времени) и масштабирования (растяжения или сжатия). Объясним идею НВП для ИП. Сначала нестационарный временной ряд измерений сигнала, представляющего ИП, разделяют на отдельные промежутки (окна наблюдений). Затем на каждом из окон наблюдений вычисляется скалярное произведение исследуемых данных с разными сдвигами некоторого вейвлета на разных масштабах [10]. В общем случае, НВП для сигнала $S(t)$ строится путем непрерывных масштабных преобразований и переносов выбранного вейвлета $\psi(t)$ с произвольными значениями коэффициента a и параметра b . Формулы прямого и обратного НВП [10], [12]:

$$W_s(a, b) = (S(t), \psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt; \quad (1)$$

$$S(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_s(a, b) \psi_{ab}(t) \frac{da db}{a^2}; \quad C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty, \quad (2)$$

где C_ψ — нормирующий коэффициент; $\psi_{ab}(t)$ — базис, построенный с помощью непрерывных масштабных преобразований и переносов материнского вейвлета $\psi(t)$; $(\cdot, \cdot)$ — скалярное произведение соответствующих сомножителей.

Применим НВП к сигналам, представляющим ИП, циркулирующие в ИС воднотранспортной отрасли. Воспользуемся пакетом Wavelet Toolbox системы MATLAB для построения вейвлет-спектров сигналов с улучшенной визуализацией [12]. Смоделируем несколько сигналов, представляющих необработанные ИП, и проведем для них НВП. На рис. 1 представлена скейлограмма (результат НВП) для сигнала $S(t)$, содержащего ярко выраженные гармонические колебания.

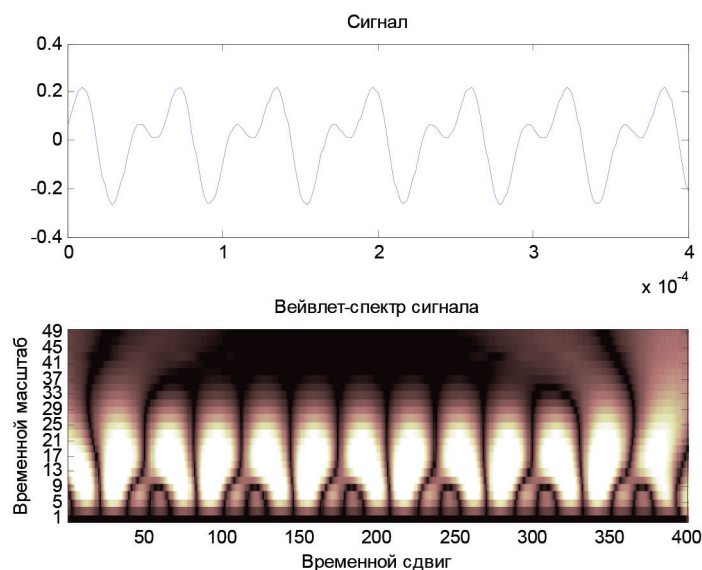


Рис. 1. Информационный поток $S(t)$, представляющий собой сигнал, содержащий ярко выраженные гармонические колебания, и его вейвлет-спектр

При анализе рядов измерений необходимо учитывать локальные особенности (скачкообразные изменения характеристик исходного ряда). На скейлограмме НВП локальные особенности сигнала представлены линиями резкого перепада яркости, исходящие из точки, соответствующей времени возникновения скачка. На рис. 2 представлена скейлограмма НВП необработанного потока $x(t)$, представляющий собой бигармонический сигнал с шумом. Сигнал $x(t)$ — сумма бигармонического сигнала $S(t)$ и белого гауссова шума $n(t)$.

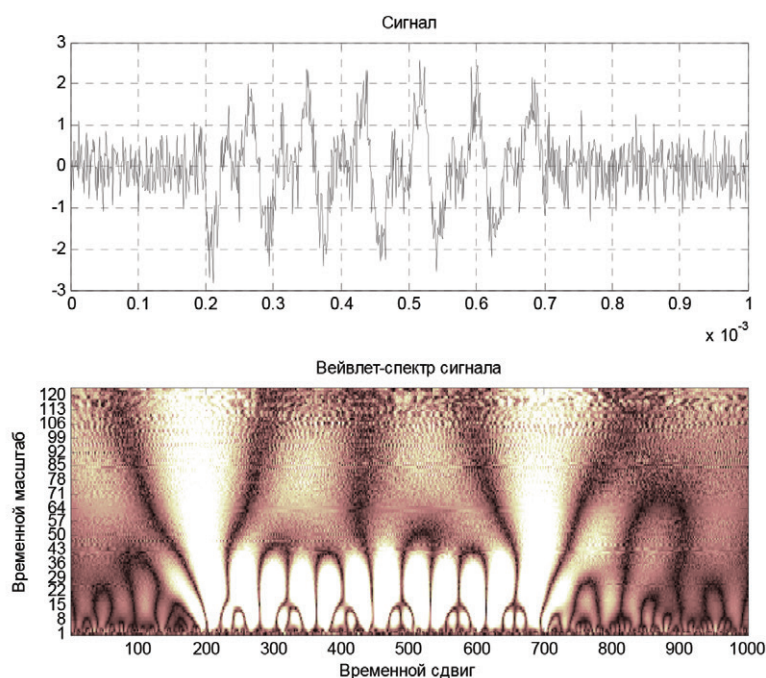


Рис. 2. Сигнал $x(t)$ (сумма бигармонического сигнала $S(t)$ и белого гауссова шума $n(t)$) и его вейвлет-спектр

На рис. 2 в нижней части скейлограммы видна сложная структура вейвлет-спектра шума. В зависимости от изменения параметров, просматривается переход из одной гармоники в другую,

отчетливо фиксируется начало и конец импульса. Темным фоном обозначены переходы сигнала через нуль, светлым — экстремумы [12]. На рис. 3 представлен поток, представляющий собой прямоугольный импульс с шумом.

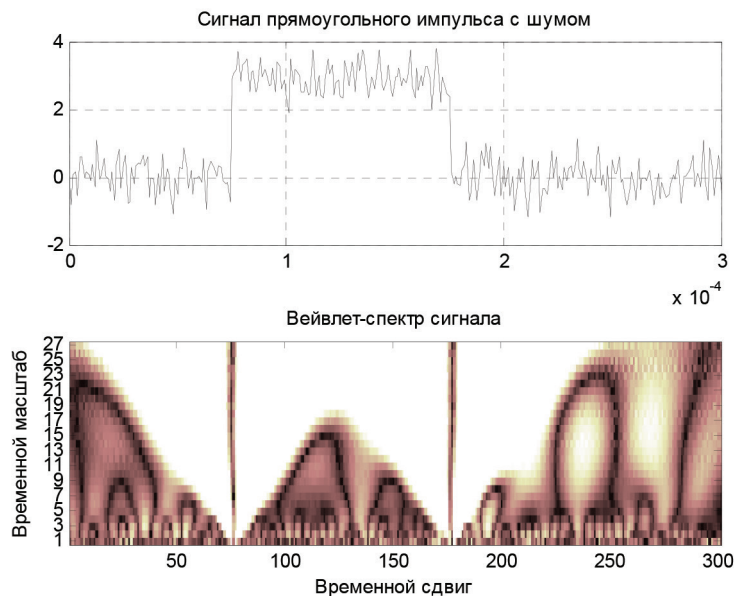


Рис. 3. Сигнал $x(t)$ (прямоугольный импульс с шумом)

В нижней части скейлограммы видна сложная структура спектра шума, в верхней части отчетливо видны наличия разрывов.

Рассмотрим и применим быстрое одномерное ДПФ для необработанных потоков. Прямое ДПФ, переводящее описание сигнала из временной области в частотную [13]:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) e^{\frac{2\pi}{N(j-1)(k-1)}}, \quad (3)$$

где x — одномерный массив с длиной N .

Обратное ДПФ, переводящее сигнал из частотной области во временную [13]:

$$x(k) = \sum_{k=1}^N X(k) e^{\frac{-2\pi}{N(j-1)(k-1)}}. \quad (4)$$

Смоделируем необработанный ИП, представляющий собой двухчастотный сигнал на фоне сильного шума, создаваемого генератором случайных чисел. На рис. 4 представлены графики зашумленного сигнала и его спектральной плотности (показано применение прямого ДПФ).

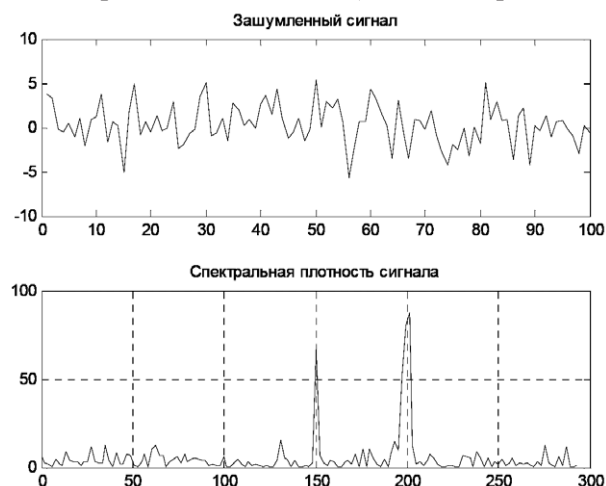


Рис. 4. Зашумленный сигнал и график его спектральной плотности

На рис. 4 (график спектральной плотности сигнала $S(t)$) видны два наиболее выраженных пика: на средней частоте амплитудно-модулированного сигнала и боковой пик. Таким образом, видны частотные составляющие сигнала, выделяющиеся на общем шумовом фоне.

Выводы

1. Предложено подразделять данные, циркулирующие в ИС для ОВТ на отдельные информационные потоки, содержащие в себе различные виды данных и сигналов. Подразделение данных на ИП способствует повышению качества и быстродействия обработки, упрощению анализа и других манипуляций с данными.
2. Адаптированы методы НВП и ДПФ для смоделированных нами ИП, представляющих собой различные сигналы.
3. С помощью вейвлет-анализа можно обнаружить как очевидные аномалии в исследуемом потоке данных, так и критические значения, скрытые за относительно небольшими абсолютными значениями элементом временного ряда измерений ИП.
4. Результаты НВП, представленные на рис. 2 и 3 показывают, что вейвлеты имеют высокую разрешающую способность при выявлении локальной (тонкой) структуры сигналов.
5. Пример, приведенный на рис. 4, показывает, что метод ДПФ применим для обнаружения слабых сигналов на фоне шумов. При этом ДПФ имеет низкое разрешение во времени по сравнению НВП (ГОСТ 54149-2010) [14], [15].
6. Приведенные методы преобразований могут быть применены для работы с потоками данных в ИС на объектах водного транспорта для обработки и прогнозирования резких перепадов ИП, циркулирующих сложных данных, включающих в себя сигналы с шумом, видеоматериалы, звуковые данные и др.

Список литературы

1. Информационные системы. Структура и классификация информационных систем [Электронный ресурс]. — URL: http://www.e-biblio.ru/book/bib/01_informatika/infteh/book/docs/piece016.htm (дата обращения: 23.10.2014).
2. Информационные технологии на водном транспорте [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.myshared.ru/slide/196877/> (дата обращения: 23.10.2014).
3. Распределенные информационные системы [Электронный ресурс]. — URL: http://www.ict.nsc.ru/win/gis/publ/inf_sys.html (дата обращения: 23.10.2014).
4. Попов Б. Н. Математические модели информационных потоков на объектах водного транспорта / Б. Н. Попов, Е. С. Федорина // Материалы V Межвуз. науч.-практ. конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 14 мая 2014 г. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2014. — С. 306–310.
5. Web-браузеры [Электронный ресурс]. — URL: http://www.csu.ac.ru/~rusear/W_T/Intreduction/web_browser.htm (дата обращения: 23.10.2014).
6. Попов Б. Н. Информационные потоки в Web-сервисах геоинформационных систем / Б. Н. Попов, Е. С. Федорина // Информационные технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. — 2014. — № 3 (14). — С. 187–193.
7. Разработка геоинформационных систем [Электронный ресурс]. — URL: <http://sovzond.ru/services/gis/> (дата обращения: 23.08.2014).
8. Геоинформационные системы [Электронный ресурс]. — URL: <http://loi.sccc.ru/gis/integro/gis/byte1.htm> (дата обращения: 26.08.2014).
9. Брайчевский С. М. Основы моделирования и оценки электронных информационных потоков / С. М. Брайчевский, А. Н. Григорьев, Д. В. Ландэ, В. Н. Фурашев. — Киев: Инжиниринг, 2006. — 176 с.
10. Додонов А. Г. Живучесть информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. — Киев: Наукова Думка, 2011. — 256 с.

11. Ландэ Д. В. Основы интеграции информационных потоков / Д. В. Ландэ. — Киев: Инжиниринг, 2006. — 240 с.
12. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие / А. Н. Яковлев. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 104 с.
13. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель / В. П. Дьяконов. — М.: ДМК Пресс, 2012. — 768 с.
14. ГОСТ 54149-2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
15. Мищенко В. Ф. Использование дискретного вейвлет-анализа в среде MatLab для расчета показателя искажения синусоиды напряжения судовой силовой сети питания / В. Ф. Мищенко, И. В. Сафронов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 34–39.

УДК 656.628:621.396: 629.12.018(075.8)

С. Ф. Шахнов,
канд. техн. наук, проф.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ РЕЧНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ

FUNCTIONAL STABILITY PARAMETERS OF THE RIVER LOCAL DIFFERENTIAL SUBSYSTEMS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM VESSEL TRAFFIC

Рассматривается методика оценки вариационно-параметрической и вариационно-функциональной устойчивости размеров зон действия контрольно-корректирующих станций речных локальных дифференциальных подсистем автоматизированных систем управления движением судов к вариациям параметров взаимных и промышленных помех. Для количественной оценки функциональной устойчивости используются коэффициенты относительной чувствительности. Получены выражения для коэффициентов относительной чувствительности при вариациях мощности, дальности и структуры взаимной помехи, а также мощности промышленной помехи. Приводится расчет устойчивости размеров зон действия контрольно-корректирующих станций при вариации параметров взаимных и промышленных помех на примере цепочки станций в зоне ответственности Администрации Волжского бассейна. Оценивается влияние вариаций различных параметров помех на функциональную устойчивость параметров контрольно-корректирующих станций.

The methodology of evaluation of variational and parametric and variational functional stability of the sizes of areas of the control and correction stations of the river local differential subsystem of the automated control system vessel traffic to variations of the parameters of mutual and industrial disturbances. For the quantitative evaluation of functional stability coefficients of relative sensitivity. The expressions for the coefficients of relative sensitivity due to variations of the power, range and patterns of mutual disturbances and power industrial disturbances. Given the stability calculation of the sizes of areas of the control and correction stations with variations of the parameters of mutual and industrial disturbances on the sample chain of the control and correction stations in the area of responsibility of the Administration of the Volga basin. Assesses the impact of variations in different parameters of interference on the functional stability of the parameters of the control and correction stations.

Ключевые слова: коэффициенты чувствительности, вероятность ошибки поэлементного приема, коэффициент взаимного различия, энергетика помехи.

Key words: sensitivity coefficient, probability of the error of piece-by-piece method, coefficient of mutual difference, power engineering of interference.

ПОВЫШЕНИЕ интенсивности судоходства на внутренних водных путях (ВВП) России и связанное с ним требование к повышению безопасности и эффективности навигации привело к необходимости внедрения современных инфокоммуникационных технологий, создающих базу для развертывания автоматизированных систем управления движением судов (АСУ ДС), предназначенных для обеспечения эффективного управления и мониторинга [1].

Работа АСУ ДС сопряжена с использованием систем позиционирования, каковыми являются спутниковые радионавигационные системы (СРНС) ГЛОНАСС/GPS. Однако для обеспечения требуемой точности позиционирования в речных условиях их радионавигационное поле обязательно должно сопрягаться с полем дифференциальной поправки (ДП) [2].

Исследования, проведенные по заказу Минтранса в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 – 2020 годы», показали, что для создания дифференциальных подсистем, обеспечивающих высокоточное радионавигационное поле на ВВП России, с экономической точки зрения наиболее перспективным является использование локальных дифференциальных подсистем (ЛДПС) на базе цепочки контрольно-корректирующих станций (ККС), работающих в диапазоне частот морской радиомаячной службы (283,5 – 325 кГц) [3].

Вопросы топологии поля ДП подробно рассмотрены в работе [4]. Важнейшим условием оптимизации топологии данного поля является исследование помехозащищенности и функциональной устойчивости радиоканалов ККС. В данной работе рассматриваются проблемы функциональной устойчивости параметров радиоканалов ККС. Под функциональной устойчивостью информационных систем понимается их способность удерживать основные эксплуатационные характеристики в заданных пределах при вариациях случайных параметров сигналов и помех, а также вариациях их частотно-временной структуры. Соответственно функциональная устойчивость подразделяется на вариационно-параметрическую, т. е. устойчивость по отношению к вариациям параметров сигналов и помех, и вариационно-функциональную, т. е. устойчивость по отношению к вариациям формы сигналов и помех.

Методология оценки функциональной устойчивости при воздействии взаимных помех базируется на исследовании вероятности ошибки поэлементного приема цифрового сигнала. При некогерентном приеме фазоманипулированных (ФМ) сигналов и взаимных помех, для случая: незамирающий сигнал, замирающая по закону Релея помеха, вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения $p_{\text{ош}}$ будет определяться выражением [5]

$$p = 0,5 \exp \left[-h^2 \frac{1}{(2 + h_n^2 g_0^2)} \right], \quad (1)$$

где h^2 , h_n^2 — энергетика сигнала и k -ой помехи соответственно; g_0^2 — нормированный коэффициент взаимного различия (КВР) сигнала и помехи в частотно-временной области.

Расчет помехозащищенности радиоканалов ЛДПС при воздействии взаимных и промышленных помех рассмотрен в ряде работ, например в [6]. В общем случае, полная вероятность ошибок поэлементного приема дискретных сигналов определяется соотношением

$$p = f(Q, Q_n, G_{\text{сн}}), \quad (2)$$

где Q, Q_n — множество варьируемых параметров сигнала и помех; $G_{\text{сн}}$ — множество КВР сигналов и помех в частотно-временной области.

Для получения количественной меры функциональной устойчивости системы воспользуемся общими методами теории чувствительности [7]. Разложим функциональные зависимости в формуле (2) в ряд Тейлора и учтем только члены с производными первого порядка. Тогда приращение вероятности ошибки будет равно

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \frac{dp}{dq_i} \Delta q_i + \sum_{i=1}^m \frac{dp}{dq_{ni}} \Delta q_{ni} + \sum_{i=1}^k \frac{dp}{dg_i^2} \Delta g_i^2. \quad (3)$$

Относительное приращение ошибки будет определяться выражением

$$\frac{\Delta p}{p} \approx \sum_{i=1}^n s_{q_i} \frac{\Delta q_i}{q_i} + \sum_{i=1}^m s_{q_{ni}} \frac{\Delta q_{ni}}{q_{ni}} + \sum_{i=1}^k s_{g_i} \frac{\Delta g_i^2}{g_i^2}, \quad (4)$$

где n, m — число варьируемых параметров сигнала и помехи соответственно; k — число варьируемых параметров КВР сигнала и помехи; $S = \{s_l\}$ — множество коэффициентов относительной чувствительности, определяемых выражением

$$s_l \approx \frac{\Delta p}{p} / \frac{\Delta q_l}{q_l}, \quad l \in \{1, 2, \dots, (n + m + k)\}. \quad (5)$$

Относительное приращение вероятности ошибки и определяет количественное выражение чувствительности характеристики помехоустойчивости. Выражение (4) устанавливает связь между функциональной устойчивостью информационных систем и чувствительностью их характеристик помехоустойчивости. Следовательно, коэффициенты относительной чувствительности S , определяемые выражением (5), можно рассматривать как количественную меру функциональной устойчивости информационных систем.

При этом коэффициенты относительной чувствительности вида

$$s_{q_i} = \frac{\Delta p}{p} / \frac{\Delta q_i}{q_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad s_{q_{ni}} = \frac{\Delta p}{p} / \frac{\Delta q_{ni}}{q_{ni}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

определяют количественную оценку вариационно-параметрической устойчивости информационной системы, а коэффициенты

$$s_{g_i} = \frac{\Delta p}{p} / \frac{\Delta g_i^2}{g_i^2}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

— вариационно-функциональную.

При наличии взаимных помех от соседних ККС параметрами, определяющими вариационно-параметрическую устойчивость подсистемы и варьируемыми с целью оптимизации топологии поля ДП, являются: энергетика сигнала, зависящая от мощности передатчика, и энергетика помехи, зависящая от расположения источника помехи и мощности ее передатчика. Тогда n и m в выражении (6) равны единице.

КВР в формуле (7) будет определяться выражением [8]

$$g = \frac{h_n^2}{h^2} \left[\frac{\sin(0,5 \Omega T)}{0,5 \Omega T} \right]^2 = \frac{h_n^2}{h^2} g_0^2, \quad (8)$$

где Ω — расстройка частоты несущих сигнала и помехи.

Тогда k в выражении (7) также будет равно единице, т. е. единственным варьируемым параметром будет Ω .

Рассмотрим функциональную устойчивость такой характеристики как дальность действия ККС. Максимальная дальность действия ККС $R_{\max}$ в азимутальном направлении определяется соотношением

$$R_{\max} = \arg \{ p_{\text{ош}}(h^2, h_n^2, g_0^2) = p_{\text{рег}} \}, \quad (9)$$

где $p_{\text{рег}}$ — требуемая вероятность ошибки поэлементного приема сообщения.

Для случая «незамирающий сигнал — замирающая по релеевскому закону помеха» зависимость $R_{\max}$ от $p_{\text{рег}}$ при некогерентном приеме ФМ сигналов может быть получена в явном виде.

Энергетика сигнала или взаимной помехи определяется выражением

$$h^2 = \frac{PT}{v^2}, \quad (10)$$

где P — мощность сигнала или взаимной помехи на входе приемника, Вт; T — длительность посылки элемента сигнала, с; v^2 — спектральная плотность флуктуационного шума, Вт/с.

Мощность в точке приема определяется выражением

$$P = \frac{E^2 l_d^2}{\rho}, \quad (11)$$

где E — напряженность поля в точке приема, В/м; l_d — действующая высота антенны, м; ρ — выходное сопротивление, Ом.

Напряженность поля определяется формулой [9]

$$|E(R)| = -\frac{0,3\sqrt{P_{\text{пер}}}}{R} w(R) \text{ [В/м]}, \quad (12)$$

где $P_{\text{пер}}$ — мощность передатчика, кВт; $w(R)$ — функция ослабления подстилающей поверхности; R — расстояние от источника сигнала или помехи до точки приема, км.

Среди промышленных помех наибольшее воздействие на радиоканалы ККС средневолнового диапазона частот оказывают импульсные помехи от коронного разряда линий электропередач (ЛЭП) и помехи от контактной сети электротранспорта. В полосе частот, выделенных ЛДПС, спектральная плотность этих помех практически постоянна, и их можно рассматривать как белый гауссовский шум. Тогда для энергетики сигнала получим

$$h^2(r) = \frac{PT}{v_n^2(r) + v^2}, \quad (13)$$

где r — расстояние от источника промышленной помехи, м; $v_n^2(r)$ — спектральная плотность мощности промышленной помехи.

Тогда, с учетом выражений (10) – (13), формула (1) примет вид

$$p_{\text{рег}} = 0,5 \exp \left[-B \frac{P_{\text{пер}}}{R_{\text{max}}^2 [v^2 + v_n^2(r)]} w(R)^2 \frac{1}{(2 + h_n^2 g_0^2)} \right], \quad (14)$$

где $B = \frac{0,09 l_d T}{\rho}$.

Так как для большинства влажных почв функция ослабления $w(R)$ на расстояниях порядка 100 – 200 км близка к единице [10], то при анализе функциональной устойчивости ее изменением можно пренебречь. Тогда выражение (14) окончательно примет вид

$$p_{\text{рег}} = 0,5 \exp \left[-B \frac{P_{\text{пер}}}{R_{\text{max}}^2 [v^2 + v_n^2(r)]} \frac{1}{(2 + h_n^2 g_0^2)} \right]. \quad (15)$$

Теперь зависимость R_{max} от $p_{\text{рег}}$ может быть выражена в явном виде

$$R_{\text{max(км)}} = \left[\frac{BP_{\text{пер}}}{\ln(2p_{\text{рег}}) [v^2 + v_n^2(r)]} \frac{1}{(2 + h_n^2 g_0^2)} \right]^{1/2}. \quad (16)$$

В этом случае вариационно-параметрическая устойчивость R_{max} будет зависеть от вариации параметров $P_{\text{пер}}$, $v_n^2(r)$ и h_n^2 , а вариационно-функциональная — от вариации g_0^2 . Количественно функциональная устойчивость будет определяться коэффициентами относительной чувствительности следующего вида:

$$s_{P_{\text{пер}}} = \frac{\partial R_{\text{max}}}{\partial P_{\text{пер}}} \frac{P_{\text{пер}}}{R_{\text{max(км)}}} = 0,5 \frac{C_0}{R_{\text{max(км)}}} [v^2 + v_n^2(r)]^{-1/2} (2 + h_n^2 g_0^2)^{-1/2}; \quad (17)$$

$$s_{h_n} = \frac{\partial R_{\text{max}}}{\partial h_n^2} \frac{h_n^2}{R_{\text{max(км)}}} = -0,5 \frac{C_0 h_n^2 g_0^2}{R_{\text{max(км)}}} (v^2 + v_n^2(r))^{-1/2} (2 + h_n^2 g_0^2)^{-3/2}; \quad (18)$$

$$s_v = \frac{\partial R_{\text{max}}}{\partial v_n^2(r)} \frac{v_n^2(r)}{R_{\text{max(км)}}} = -0,5 \frac{C_0 v_n^2(r)}{R_{\text{max(км)}}} (v^2 + v_n^2(r))^{-3/2} (2 + h_n^2 g_0^2)^{-1/2}; \quad (19)$$

$$s_g = \frac{\partial R_{\text{max}}}{\partial g_0^2} \frac{g_0^2}{R_{\text{max(км)}}} = -0,5 \frac{C_0 h_n^2 g_0^2}{R_{\text{max(км)}}} (v^2 + v_n^2(r))^{-1/2} (2 + h_n^2 g_0^2)^{-3/2}. \quad (20)$$

Здесь

$$C_0 = \left| \frac{BP_{\text{пер}}}{\ln(2p_{\text{рег}})} \right|^{1/2}. \quad (21)$$

Проанализируем вариационно-параметрическую устойчивость радиоканалов ККС в зоне ответственности ФБУ «Администрация Волжского бассейна» путем исследования чувствительности размера зоны действия ККС к вариациям параметров взаимной и индустриальной помехи на примере ККС «Самара». В качестве источника взаимных помех будем рассматривать ККС «Саратов».

Мощности всех передатчиков составляют 400 Вт и варьированию не подлежат. Требуемая вероятность ошибки поэлементного приема сообщения $p_{\text{рег}}$ составляет 10^{-4} ; длительность посылки сигнала $T = 0,01$ с; спектральная плотность белого шума $v^2 = 10^{-10}$ Вт·с [11].

Подставляя выражения (16) и (21) в формулу (18), получим

$$S_{h_n} = \frac{\partial R_{\text{max}}}{\partial h_n} \frac{h_n}{R_{\text{max(км)}}} = -0,5 \frac{h_n g_0^2}{2 + h_n g_0^2}. \quad (22)$$

Этим же выражением будет описываться и коэффициент S_g . Аналогично, из выражения (19) имеем

$$S_v = -0,5 \frac{v_n^2}{v^2 + v_n^2}. \quad (23)$$

Таким образом, коэффициент относительной чувствительности S_{h_n} исследуется путем варьирования энергетики взаимной помехи при различных фиксированных значениях нормированного КВР, а коэффициент S_g — путем варьирования нормированного КВР при различных фиксированных значениях энергетики помехи. Коэффициент S_v исследуется при варьировании спектральной плотности мощности индустриальной помехи.

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента относительной чувствительности S_{h_n} от вариации энергетики взаимной помехи для различных значений нормированного КВР сигнала и взаимной помехи, а на рис. 2 — зависимость коэффициента относительной чувствительности S_g от вариации нормированного КВР в пределах заданного диапазона несущих частот радиомаячной службы для различных значений энергетики взаимной помехи, построенные согласно выражению (22).

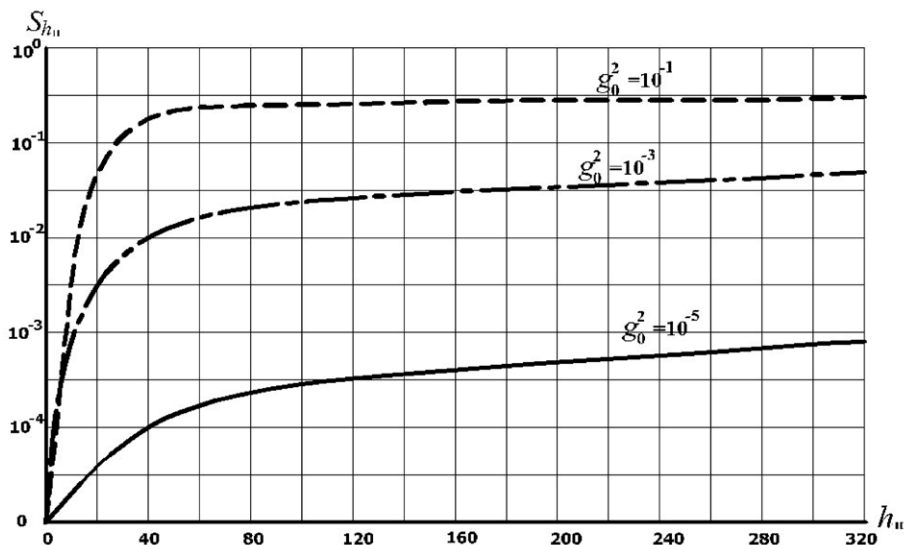


Рис. 1. Зависимость относительной чувствительности размера зоны действия ККС от энергетики взаимной помехи

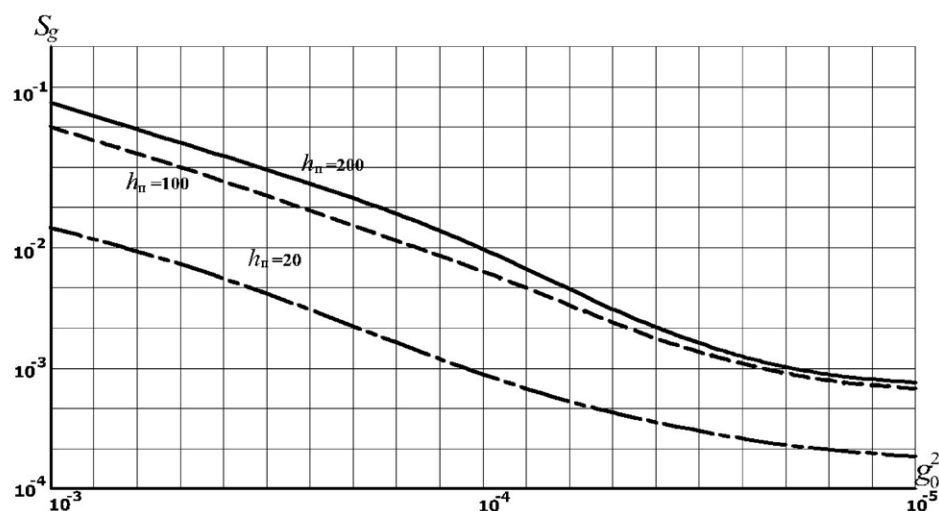


Рис. 2. Зависимость относительной чувствительности размера зоны действия ККС от нормированного КВР сигнала и помехи

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента относительной чувствительности S_v от вариации спектральной плотности мощности индустриальной помехи, построенная согласно выражению (23).

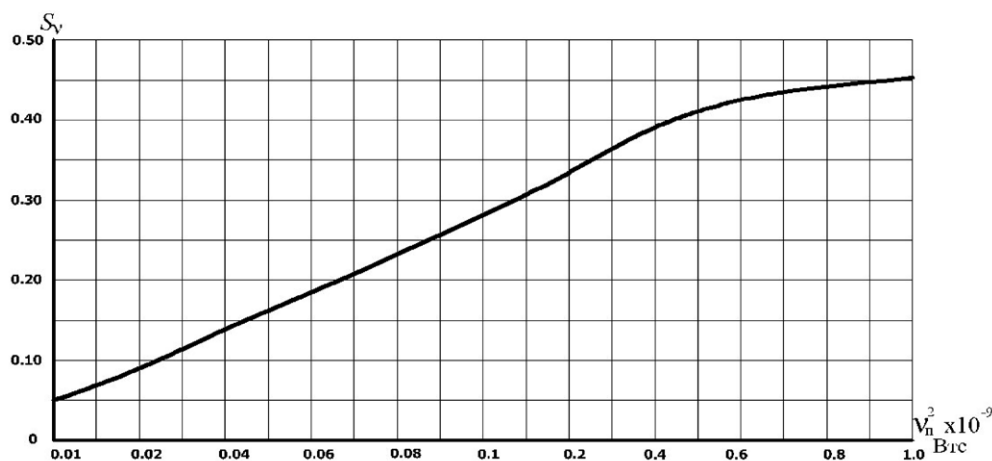


Рис. 3. Зависимость относительной чувствительности размера зоны действия ККС от спектральной плотности мощности индустриальной помехи

Из выражений (22) и (23) следует, что функции S_{h_n} и S_v имеют экстремум, равный 1/2. Так как нормированный КВР может изменяться только в пределах 0 – 1, функция S_g при различных фиксированных значениях h_n^2 экстремума не имеет.

Вариации частотно-временной структуры сигнала и взаимной помехи при изменении разнеса несущих частот рассматриваются в широком диапазоне: от минимально возможного шага нарезки частот в 500 Гц, что соответствует значению нормированного КВР 10^{-3} , до 6000 Гц — реально выбранный разнос несущих частот между ККС «Самара» и ККС «Саратов» ($g_0^2 = 10^{-5}$).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

– чувствительность размера зоны действия ККС к вариациям уровня энергетики взаимной помехи при значениях $h_n^2 > 40$ невелика. В то же время она сильно зависит от величины нормированного КВР сигнала и помехи;

- чувствительность к вариациям спектральной плотности мощности индустриальной помехи значительно выше, чем чувствительность к вариациям энергетики взаимной помехи при условии рационального выбора несущих частот соседних ККС;
- при рациональном распределении частотного ресурса между различными ККС ЛДПС одного региона, что всегда возможно осуществить в силу незначительного числа станций (6 – 7), обеспечивающих сплошное поле ДП в пределах региона, вариации нормированного КВР сигнала и взаимной помехи практически не оказывают влияния на размер зоны действия ККС;
- чувствительность параметров ККС к вариациям спектральной плотности мощности индустриальной помехи велика, но в силу локальности индустриальные помехи не могут оказывать влияние на размер зоны действия ККС, а могут лишь создавать локальные разрывы сплошного поля ДП.

Список литературы

1. Сикарев И. А. Помехоустойчивость и функциональная устойчивость автоматизированных идентификационных систем мониторинга и управления на речном транспорте: монография / И. А. Сикарев. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 142 с.
2. Каретников В. В. К вопросу обеспечения электромагнитной защищенности каналов передачи информации речной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS / В. В. Каретников, И. Г. Кузнецов, С. Ф. Шахнов // Морская радиоэлектроника. — 2014. — Вып. № 1 (47). — С. 53–55.
3. Проведение в соответствии с международными соглашениями и требованиями комплексных исследований использования системы ГЛОНАСС, других глобальных навигационных спутниковых систем и их функциональных дополнений в составе автоматической идентификационной системы и системы управления движением судов для обеспечения мониторинга морских и речных судов, а также для взаимного контроля судов и их безопасного расхождения: отчет о НИР (окончательный) / А. А. Сикарев, И. А. Сикарев, С. Ф. Шахнов [и др.]. — СПб.: ООО Инфоком, 2014. — 272 с.
4. Каретников В. В. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — 2-е изд. — СПб.: ГУМРФ, 2013. — 525 с.
5. Шахнов С. Ф. К расчету помехозащищенности радиоканалов речной ЛДПС при использовании детерминированных сигналов и взаимных помех / С. Ф. Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 24–30.
6. Шахнов С. Ф. Расчет помехозащищенности радиоканалов речной локальной дифференциальной подсистемы автоматизированной системы движением судов в бассейне Оби / С. Ф. Шахнов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2014. — № 4. — С. 122–124.
7. Городецкий Ю. И. Функции чувствительности и динамика сложных механических систем: учеб. пособие / Ю. И. Городецкий. — Н. Новгород: ННГУ, 2006. — 236 с.
8. Шахнов С. Ф. Расчет функции ослабления поля контрольно-корректирующих станций с учетом влияния подстилающей поверхности / С. Ф. Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — Вып. 1 (29). — С. 116–123.
9. Каретников В. В. Расчет помехозащищенности радиоканалов речной локальной дифференциальной подсистемы автоматизированных систем управления движением судов (на примере ФБУ «Администрация Волжского бассейна») / В. В. Каретников, И. А. Сикарев, С. Ф. Шахнов // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 6. — С. 54–57.
10. Сикарев А. А. К расчету напряженности поля в радиоканалах речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS средневолнового диапазона / А. А. Сикарев, С. Ф. Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — Вып. № 3 (25). — С. 27–32.
11. Доровских А. В. Сети связи с подвижными объектами: монография / А. В. Доровских, А. А. Сикарев. — Киев: Техника, 1989. — 155 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Авдеев Борис Александрович

Аспирант

Научный руководитель: Голиков Сергей Павлович, кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»
dirigeant@mail.ru

Андреева Марина Юрьевна

Кандидат экономических наук, доцент
НОУ «МФПУ «Синергия»
marinand@yandex.ru

Андрюшечкин Юрий Николаевич

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
kaf_tss@gumrf.ru

Барышников Сергей Олегович

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
rector@gumrf.ru

Бухарметов Максим Радикович

Аспирант

Научный руководитель: Нырков Анатолий Павлович, доктор технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
evrolittle@yandex.ru

Васильев Кирилл Алесандрович

Аспирант

Научный руководитель: Дацюк Тамара Александровна, доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ»
kirttrill@mail.ru

Галин Александр Валентинович

Кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
alvgal@mail.ru

Гарибин Павел Андреевич

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
garibin@mail.ru

Глеклер Елена Алексеевна

Соискатель

Научный руководитель: Григорьев Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
info@eds-marine.ru, glekler@eds-marine.ru

Горохов Михаил Сергеевич

Аспирант

Научный руководитель: Роннов Евгений Павлович, доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
mahailo@mail.ru

Григорьев Андрей Владимирович

Кандидат технических наук, доцент, генеральный директор
ООО «МИП «Электродвижение судов»
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
info@eds-marine.ru

Гуща Иван Андреевич

Преподаватель
Военный институт
(военно-морской политехнический)
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
bugel619.gusha@yandex.ru

Дорожко Вениамин Мефодьевич

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
ФГБУН «Институт автоматики и процессов управления» Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН)
bendor@iacp.dvo.ru

Дыда Александр Александрович

Доктор технических наук, профессор
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
daoskin@mail.ru

Ермаков Сергей Владимирович

Старший преподаватель
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»
esv.klgd@mail.ru

Исмаилов Замиг Омар

Аспирант, директор
Kaspian Marin Servisez Limitid, Баку, Азербайджан
Научный руководитель: Нагиев Фаик Бахман, доктор физико-математических наук, профессор
nagiyevfaik@gmail.com
Азербайджанская государственная морская академия (АГМА)
z.ismayilov@caspmarine.com

Ивановская Александра Витальевна

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»
invkerch@yandex.ru

Каляуш Александр

Старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
a-kaliaush@yandex.ru

Каретников Владимир Владимирович

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
kaf_tss@gumrf.ru

Коптев Александр Владимирович

Кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
Alex.Koptev@mail.ru

Кочнева Ирина Борисовна

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
iringre@mail.ru

Крайнова Вера Владимировна

Кандидат экономических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
kvv-nnov@mail.ru

Кузнецов Александр Львович

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
thunder1950@yandex.ru

Купальцева Евгения Владимировна

Аспирант, инженер- конструктор I кат
ООО ГЦКБ Речфлота
Научный руководитель: Роннов Евгений Павлович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
kupaltseva@gckb.ru

Лаврентьева Елена Александровна

Доктор экономических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
e_lavrentieva@mail.ru

Маринич Александр Николаевич

Кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
amarinich@mail.ru

Масюткин Евгений Петрович

Кандидат технических наук, профессор, ректор
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской
технологический университет»
kgmtu@kgmtu.ru

Махин Владимир Петрович

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
vmahin@mail.ru

Нагиев Фаик Бахман

Доктор физико-математических наук, профессор
Азербайджанская государственная морская
академия (АГМА)
nagiyevfaik@gmail.com

Наумов Виктор Степанович

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
naumov1@vgavt-nn.ru

Наумова Алла Константиновна

Зав. сектором учебного отдела
ФГАОУ ВО «СПбПУ»
alya_naumova@mail.ru

Осокина Елена Борисовна

Старший преподаватель
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
Olena61@yandex.ru

Оськин Дмитрий Александрович

Кандидат технических наук, доцент
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
daoskin@mail.ru

Плотникова Антонина Игоревна

Аспирант
Научный руководитель: Лаврентьева
Елена Александровна, доктор экономических наук,
профессор
e_lavrentieva@mail.ru
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
antonina-20@mail.ru

Попов Борис Николаевич

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
boris.n.popov@gmail.com

Потехина Екатерина Вадимовна

Доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
kaf_tm@gumrf.ru

Припотнюк Андрей Владимирович

Заведующий лабораторией
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
apripotnyuk@mtc.spb.su

Просвирнин Виктор Иванович

Доктор технических наук,
профессор
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
vip-3434@mail.ru

Пухальский Владимир Аркадьевич

Аспирант, технический директор
ОАО «Морской порт Санкт-Петербург»
Научный руководитель: Королева
Елена Арсентьевна, доктор экономических наук,
профессор
kea_56@mail.ru
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
v.puhalsky@seaport.spb.ru

Решняк Валерий Иванович

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
rv53@mail.ru

Родимов Николай Владимирович

Аспирант
Научный руководитель: Сивоконь
Владимир Павлович, доктор технических наук,
профессор
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
NRLoki514@gmail.com

Роннов Евгений Павлович

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
ptps@vgavt-nn.ru

Селиверстов Святослав Александрович

Научный сотрудник
ФГБУН «Институт проблем транспорта
им. Н.С. Соломенко Российской академии наук»
amuanator@rambler.ru

Селиверстов Ярослав Александрович

Научный сотрудник
ФГБУН «Институт проблем транспорта
им. Н.С. Соломенко Российской академии наук»
amuanator@rambler.ru

Страшко Анатолий Николаевич

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
anstrashko@yandex.ru

Субботин Михаил Викторович

Аспирант, главный инженер проекта
ООО «Морское строительство и технологии»
Научный руководитель: Гарибин
Павел Андреевич, доктор технических наук,
профессор
garibin@mail.ru
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
subbotinmikhail@yandex.ru

Сухотерин Михаил Васильевич

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
Kaf_tm@gumrf.ru

Теплов Эрнст Петрович

Доктор политических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
kaf.koib@gmail.com

Труднев Сергей Юрьевич

Старший преподаватель
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
trudnev@mail.ru

Устинов Юрий Матвеевич

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
amarinich@mail.ru

Федорина Елена Сергеевна

Аспирант
Научный руководитель: Попов
Борис Николаевич, кандидат технических наук,
профессор
boris.n.popov@gmail.com
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
esfedorina@gmail.com

Шабанов Вячеслав Анатольевич

Старший преподаватель
ФГБОУ ВПО «Национальный
минерально-сырьевой университет «Горный»
knez_rus@mail.ru

Шахнов Сергей Федорович

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
sfshah@yandex.ru

Яснов Андрей Павлович

Аспирант
Научный руководитель: Каретников
Владимир Владимирович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
yasnovandrey@gmail.com

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Выпуск 2 (30)

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 24.04.15. Формат 60х90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 29,5. Тираж 500 экз. Заказ № 258/2015

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7