

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 3 (31)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2015**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — Вып. 3 (31). — 228 с.

ISSN 2309-5180

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

В Вестнике публикуются материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников: **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: Эксплуатация водного транспорта, судовождение, Водные пути сообщения и гидрография; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: Судостроение и судоремонт, Судовые энергетические установки, системы и устройства; **08.00.00 «Экономические науки»** в разделе: Экономика и управление на транспорте; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе: Электротехнические комплексы и системы; **05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»** в разделе: Информационные технологии и автоматизация на транспорте.

Статьи публикуются на русском и английском языках.

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

Статьи рецензируются независимыми экспертами.

Кроме того, в Вестнике публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний; сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

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

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

С 2009 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
<i>Андреев А. А., Андреева М. Ю.</i> Использование конструктивных возможностей азиподов на танкерах усиленного ледового класса при плавании в Арктике	7
<i>Дерябин В. В.</i> Нечёткая модель прогноза скорости дрейфа судна	14
<i>Крюков Н. Д., Шматков В. А.</i> Учёт течений, генерируемых ветром, при плавании судов	23
<i>Лупачев В. В., Кубасов Р. В., Богданов Р. Б.</i> Влияние климатогеографических условий на состояние здоровья моряков во время рейса (на основе анализа публикаций)	30
<i>Ахундова Г. А.</i> Исследование поглощения интенсивности акустической волны в океане	36
<i>Кирсанов М. Н.</i> Аналитическое исследование деформаций плоской фермы арочного типа	42
<i>Анненков Л. В.</i> Исследование устойчивости защемленной прямоугольной пластины, сжатой в одном направлении	48
ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ	54
<i>Колосков Е. Н., Фирсов Ю. Г.</i> Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа дна и донного газопроявления в северных морях России	54
<i>Каретников В. В., Волков Р. В., Киселевич Г. В.</i> Использование речной дифференциальной подсистемы Глонасс/GPS на внутренних водных путях Российской Федерации при проведении путевых работ	63
<i>Дорошенко Н. И.</i> Повышение эффективности седиментационной очистки ливневых сточных вод от железа	69
<i>Пластинин А. Е.</i> Оценка размера вреда, причиненного почве, при разливах нефти с судов	74
<i>Селиверстов Я. А., Селиверстов С. А.</i> Применение метода имитационного моделирования для оценки эффективности новых видов городского пассажирского транспорта	83
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА	93
<i>Безюков О. К., Жуков В. А., Тимофеев В. Н.</i> Современная концепция регулирования охлаждения судовых дизелей	93
<i>Иванченко А. А., Петров А. П., Живлюк Г. Е.</i> Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов	103
<i>Кулаченков С. А., Безпальчук С. Н., Белецкий Е. Н.</i> Перспективы способа магнитореологического полирования ответственных деталей топливной аппаратуры судовых двигателей внутреннего сгорания	113
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТЕ	120
<i>Давыденко А. А., Кириченко А. В., Кузнецов А. Л.</i> Обоснование концепции создания транспортной системы совместного использования в Арктическом регионе Российской Федерации	120
<i>Пантина Т. А., Бородулина С. А.</i> К вопросу формирования системы мониторинга подпрограммы «Внутренний водный транспорт» ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010 - 2020 годы)»	124

выпуск **3(31)**
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:**

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

- Изотов О. А.* Обоснование оптимальных капиталовложений
в формирование транспортной инфраструктуры обеспечения работ
на арктическом шельфе России 132
Вепринская Т. А., Панасенко З. А. Специфика применения модели массового
обслуживания для определения рациональной численности ролл-трейлерного
парка линейной компании 138
Алексеева Е. Г. Анализ системы и организационной структуры управления
навигационно-гидрографическим обеспечением судоходства 145

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 156

- Сахаров В. В., Чертков А. А., Сабуров С. В.* Моделирование стационарных
режимов в электрических и гидравлических сетях средствами нелинейного
программирования 156
Григорьев А. В., Зайнуллин Р. Р. Анализ режимов эксплуатации судовых
валогенераторных установок с преобразователями частоты и синхронными
компенсаторами 164
Барцевский Е. Г. Влияние конструктивных особенностей генераторных
агрегатов на параметры модулированного напряжения генератора 171
Приходько В. М., Приходько И. В., Игнатов Д. И. Повышение эффективности
энергообеспечения судостроительно-судоремонтных предприятий 175

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ТРАНСПОРТЕ 187**

- Кузнецов В. Н., Матвеев А. А., Нырков А. П.* Алгоритм построения вектора
признаков при распознавании судов 187
Фетисов В. А., Майоров Н. Н. Решение задачи прогнозирования и оперативного
управления работой морской контейнерной линией на основе имитационного
моделирования 193
Юрин И. В., Пантюхин И. С. Проверка гипотезы создания цифрового
полиграфа на основе видео и аудио данных 202
Король Р. Г., Балалаев А. С. Имитационная модель системы «железнодорожная
станция — морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла 209
Тындыкарь Л. Н., Крупенина Н. В., Барышникова Н. Ю. Организация
распределенной системы подготовки и проведения электронного тестирования
для оценки соответствия профессиональных компетенций работников
морских специальностей 216

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	7
<i>Andreev A. A., Andreeva M. Ju.</i> Additional potential of the azipod for ice-classed tankers operating in the Arctic	7
<i>Derjabin V. V.</i> Fuzzy inference vessel's drift speed prediction system	14
<i>Krjukov N. D., Shmatkov V. A.</i> Account of wind currents in navigation	23
<i>Lupachev V. V., Kubasov R. V., Bogdanov R. B.</i> Climate-geographic environment effect to sailor staff health during sea voyage (publications	30
<i>Ahundova G. A.</i> The absorption intensity of the acoustic waves in the ocean	36
<i>Kirsanov M. N.</i> Analytical study of deformations of a flat truss arch type	42
<i>Annenkov L. V.</i> Explore of stability of clamped rectangular plate, compressed in one direction	48
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	54
<i>Koloskov E. N., Firsov Ju. G.</i> Implementation of the new hydrographic technologies for bottom topography and seafloor gas venting investigations in the Russian northern seas	54
<i>Karetnikov V. V., Volkov R. V., Kiselevich G. V.</i> To the question of use river differential subsystem GLONASS / GPS on the inland Russian waterways at carrying out of track works	63
<i>Doroshenko N. I.</i> Improving the efficiency of sedimentation rainwater treatment of iron	69
<i>Plastinin A. E.</i> Assessment of the extent of harm to the soil at oil spills from vessels	74
<i>Seliverstov Ja. A., Seliverstov S. A.</i> About using simulation to evaluate the efficiency of the new type of the urban passenger transport	83
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	93
<i>Bezjukov O. K., Zhukov V. A., Timofeev V. N.</i> Contemporary conception of regulation in cooling system of ship's diesel engines	93
<i>Ivanchenko A. A., Petrov A. P., Zhivljuk G. E.</i> Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions	103
<i>Kulachenkov S. A., Bezpalchuk S. N., Beleckij E. N.</i> Prospects the way magneto-rheological polishing responsible parts of fuel equipment of ship engine	113
ECONOMICS AND MANAGEMENT OF TRANSPORT	120
<i>Davydenko A. A., Kirichenko A. V., Kuznecov A. L.</i> Theoretical justification for the development of multi-users transportation system in the Arctic region of Russian Federation	120
<i>Pantina T. A., Borodulina C. A.</i> Formation of monitoring system for Federal Program "Development of Transport System in Russia (2010-2020)" (direction "Inland water transport")	124
<i>Izotov O. A.</i> Substantiation of the optimum investment in developing transport infrastructure for the work on the Russia's arctic shelf	132
<i>Veprinskaja T. A., Panasenko Z. A.</i> Specifics of use the queuing model for search a rational number of roll-trailers for linear company	138
<i>Alekseeva E. G.</i> Analysis of the system and the organizational structure of shipping navigation and hydrographic support management	145

edition **3(31)**
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, Profe
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 156

Saharov V. V., Chertkov A. A., Saburov S. V. Simulation of stationary regimes
in electric and hydraulic networks by means of nonlinear programming 156
Grigorev A. V., Zajnullin R. R. Analysis of operation modes of ship shaft generator
plants with frequency converters and synchronous compensators 164
Barshhevskij E. G. Influence of design features genset on parameters modulated
voltage generator 171
Prihodko V. M., Prihodko I. V., Ignatov D. I. Improving the efficiency
of energy supply shipbuilding and ship-repairing enterprises 175

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 187

Kuznecov V. N., Matveev A. A., Nyrkov A. P. The signs detection algorithm
in ship recognition solution 187
Fetisov V. A., Majorov N. N. Solution to the problem of forecasting and operational
management of maritime container lines on the basis of simulation 193
Jurin I. V., Pantjuhin I. S. Testing the hypothesis of creating a digital polygraph
based on video and audio data 202
Korol R. G., Balalaev A. S. The simulation modeling system «railway station –
seaport» Vladivostok transport hub 209
Tyndykar L. N., Krupenina N. V., Baryshnikova N. Ju. Organization
of a distributed system by electronic testing for conformity assessment
of professional competencies by employees 216

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК 656.61.052

А. А. Андреев,
капитан танкера;

М. Ю. Андреева,
канд. экон. наук, доц.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АЗИПОДОВ НА ТАНКЕРАХ УСИЛЕННОГО ЛЕДОВОГО КЛАССА ПРИ ПЛАВАНИИ В АРКТИКЕ

ADDITIONAL POTENTIAL OF THE AZIPOD FOR ICE-CLACCED TANKERS OPERATING IN THE ARCTIC

В статье рассмотрены движители (азиподы), которыми оснащены суда повышенной ледовой проходимости и дополнительные возможности аzipодов при плавании в затороженных льдах Арктики. Приведены результаты личных наблюдений, полученных при управлении танкером «Тимофей Гуженко», на основании которых можно сделать выводы о том, что разрушение льда «снизу» при генерировании струи от аzipодов дает возможность ломать лед с использованием меньшей мощности. Изменение угла наклона вертикальной оси установки аzipода в корпусе судна позволяет изменять плоскость направления вращения аzipодов, благодаря чему наблюдается снижение потерь мощности от влияния корпуса. Дальнейшее совершенствование системы позволит значительно повысить судходные характеристики и безопасность плавания во льдах.

At this article we are trying to pay attention on the additional ability of the Azipod handling ships during Arctic ice readge penetration. It was observed that destruction of the ice from sea side under generation of Azipod propeller flow give us the possibility penetrate through the ice with less power consumption on the bases of the hands operation of the m\l Timofey Guzenko equiped with Azipods .If the angel of inclination of the Azipod axe had been changed the direction of the rotation Azipod and flow will changed accordingly it gives us possibility to reduce influence of the hull designThe future innovation Azipods system are necessary for increasing ships possibility for ice navigation and safe navigation at Arctic.

Ships for arctic, built during last ten years are quite often equipped with revolutionary propulsion devices known under the name AZIPODs. There are many reasons for choosing AZIPODs as main propulsion units, the main reason being excellent maneuvering characteristics achieved. However in case of large propulsion units, having power of 45 MW, used for propulsion there are also some advantages during proceeding through ridge ice , the last mainly related to operational factors. Handling of ships equipped with AZIPODS is different from handling conventional icebreaker ships and in certain maneuvering situations safety of the ship and of the propulsion units might be endangered. Therefore some innovation proposals offers on handling procedures are necessary and it is essential that masters of ships fitted with AZIPODs must be specially equipped and trained.

*Ключевые слова: судовождение в Арктике, аzipоды, суда двойного назначения, плавание во льдах.
Key words: Ship maneuverability, podded propulsion, handling of ships with Azipods.*

ВЕЛИКИЙ русский флотоводец вице-адмирал С. О. Макаров отмечал, что если Россию сравнивать с домом, то ее фасад выходит в Арктику. Хозяйственное освоение континентального шельфа, строительство новых портов и заводов по переработке углеводородов, а также сопутствующее этому прогнозируемое увеличение численности населения региона актуализирует задачу осуществления круглогодичной навигации в Арктике. Активизация судходства по трассам Северного морского пути определяется не только политической волей и внешнеэкономической ситуацией, но и теми технологическими прорывами в области судостроения, которые делают круглогодичную навигацию реальностью.

В XVIII в. купец Михаил Бритнев продлил навигацию в Кронштадте на несколько недель, обрезав нос у своего судна. В это же время в США было замечено, что при буксировке тороса, под разрушительным влиянием струи от винтов, последний распадается за счет размывания подводной части, где консолидация льда значительно больше, но смерзание его достаточно слабое за счет нахождения льда под водой [1]. В 1887 г. американец Кирби предложил оснащать ледоколы носовым гребным винтом. Спустя шесть лет судно «Сент-Мери» было построено для озера Мичиган и уже первые его рейсы подтвердили правильность самой идеи.

Концепции изменения носовой части и оснащения ее винтом были использованы С. О. Макаровым на ледоколе «Ермак», но впоследствии от носового винта пришлось отказаться ввиду слабости вала по сравнению с ледовой нагрузкой и, соответственно, постоянных повреждений вала и винта.

Следует отметить, что в основе развития отечественного ледокольного флота лежит увеличение мощности ледоколов и использование атомной энергии. Однако сама по себе мощность не могла дать такого эффекта, как работа всего комплекса во взаимодействии: движителя, двигателя и обводов корпуса и, конечно, большую роль имел опыт управления всем этими элементами. При ледокольных испытаниях а/л «Ленин» и дизельного л/к «Ленинград» натурные испытания показали, что имея почти двукратное превосходство в мощности, л/к «Ленин» не смог обогнать л/к «Ленинград», а при сравнительных испытаниях финского л/к «Торо» с носовым винтом л/к «Ермак» первый прошел там, где второй не смог пройти и застрял [2].

Таким образом, исследования деформации льда за счет технических нагрузок можно свести к решению двух типов задач: определение максимальной нагрузки на лед и определение минимального напряжения, при котором происходит его разрушение [3]. Толщина ледового покрова в Арктике, согласно исследованиям К. Вейприхта, зависит от количества холода и тепла в течение рассматриваемого периода времени. Так, К. Вейприхт рассчитал, что максимальная толщина ровного льда может достигать 260 см [4]. Продолжив исследования льда, В. А. Афанасьев вывел формулу расчета силы, необходимой для разлома льда. Согласно выполненным расчетам, для безостановочного движения во льду со скоростью 1 уз, при толщине льда 12 футов, необходимо 52000 л.с. мощности. Такую мощность имеет уже сейчас л/к «50-летие победы» – 55 МВт и вновь заложенный л/к «Арктика» – 60 МВт. Экспериментальные, а затем и коммерческие рейсы на Северный полюс подтверждают эти предположения.

Поведению льда вокруг судов при плавании в море посвящены многие отечественные и зарубежные исследования [5] – [9]. Тем не менее, согласно справедливой оценке Ю. П. Дронова, ввиду сложности строения льда и особенностей его поведения под нагрузкой, многие его механические характеристики не могут вычислены аналитически, а определяются только экспериментально. При этом приходится иметь в виду, что морской лед поликристалличен. В нем всегда имеются пустоты и поэтому даже при выборе для анализа образцов льда из одной льдины неизбежны различия в результатах эксперимента [3, с. 158]. Наряду с изучением льда и моделированием поведения судна при плавании во льду технология судостроения совершенствуется, разрабатываются новые концепции движения во льдах. Одной из таких концепций, разработанной финской судостроительной корпорацией «ABB» (рис. 1), является движение с помощью азимутальных устройств типа «азипод»¹ [10], [11]. При сопровождении транспортных судов ледоколами суда часто застревали и ледоколу приходилось возвращаться к ним для обколки. При этом затрачивалось огромное количество времени для разворота ледокола. Поворотное устройство аzipод позволило простым его разворотом исключить потерю времени, затрачиваемую на этот процесс, и сразу идти кормой к застрявшему судну, т.е. выполнять операцию *двойного действия*.

¹ Аzipод конструктивно представляет собой движительную колонку с электродвигателем, расположенным внутри обтекаемой гондолы с возможностью поворота вектора упора по азимуту. С 1998 г. является зарегистрированной торговой маркой финского консорциума «ABB AZIPOD OY».

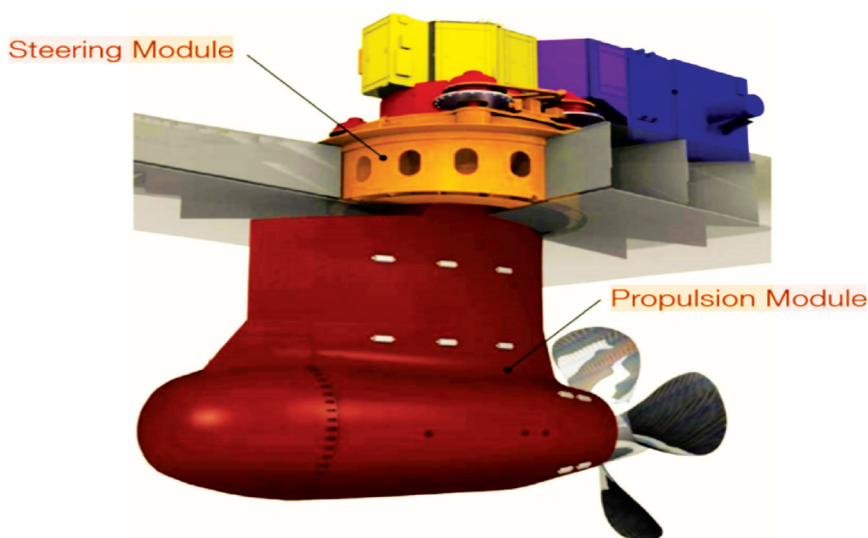


Рис. 1. Модель аzipода корпорации «ABB»

Технология аzipодов активно используется в Арктике. В частности, преимущества, возможности и перспективы судов двойного назначения активно обсуждались в рамках 16- и 17-й Международных конференций по вопросам инженерного обеспечения портов и океанских сооружений в условиях Арктики², проводимых в Канаде, и Международного симпозиума по Охотскому морю и морскому льду³, проводимого в Японии. В России для транспортировки грузов используются оснащенные аzipодами суда ОАО «Норильский Никель» (оснащены одним аzipодом) и танкеры ОАО «Лукойл» (оснащены двумя аzipодами). Танкеры ОАО «Лукойл» работают на самом северном морском терминале мира – о. Варандей. Использование аzipодов позволяет осуществлять круглогодичную навигацию в Печорском и Карском море без помощи ледоколов [12].

Управление аzipодами позволило отметить многочисленные преимущества движения судна кормой в очень толстом льду на малых скоростях, такие как обмыв корпуса струей от винта, сброс ледовой подушки от налипания льда на корпус, размыв торосов льда в кормовой части, избежание заклинивания судна. Тяжелые ледовые условия в определенные периоды времени, превышающие проектные показатели, заставили капитанов искать новые пути управления аzipодными комплексами. Так, используя балластную систему, меняя осадку и крен, и тем самым поднимая винт и изменяя угол атаки струи винта на лед, был отмечен колоссальный эффект разрушения ледяного поля струей от аzipодов. Управляя аzipодами, а точнее, струей от них, совмещая обе струи, суда могут двигаться без заклинивания за счет управления разрушительной силой струй.

Исходя из имеющегося опыта, предлагается изменить конструкцию аzipода, сделав его вращающимся не только вокруг горизонтальной, но и вокруг вертикальной оси на вновь проектируемых судах, или устанавливать аzipод под углом к вертикальной плоскости уже сейчас (в частности, на танкерах-газовозах, строящихся для проекта «Ямал СПГ»). Практически, это может быть сделано и на имеющихся судах в случае изменения осадки и крена судна. Основной сложностью реализации при этом являются повышенные требования к судоводителям, обеспечивающим проводку судна во льду.

Следует отметить, что классический ледокол пытается проломить лед своим корпусом за счет мощности и конфигурации носа. Однако в результате пробивания льда сверху происходит опрессовывание и без того заторошенного льда толщиной 5 м и более, что делает его неподдающимся разлому [5], [7], [13]. Новые технологии, такие как аzipод, позволяют разрушить лед снизу, что делает их незаменимыми для реализации задачи круглогодичной навигации по Северному

² International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions.

³ Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice.

морскому пути. В связи с этим возникает вопрос: *почему до сих пор на это специалисты не обращали внимание?* По-видимому, данное обстоятельство было вызвано тем, что использование одного аzipода не позволяет добиться нужного эффекта за счет тяги в обратную сторону винта, – судно просто отходит вперед от кромки льда и оператор видит только струю в канале после отхода судна. Оснащение двумя аzipодами позволяет удерживать корму у края кромки льда, работая аzipодами «враздрай» и компенсируя тем самым тягу. Натурные наблюдения за возможностями аzipодов проводились на танкере «Тимофей Гуженко» (Совкомфлот – о. Варандей). Тип судна – Shuttle tanker, класс судна RMRS, ABS; ледовый класс Arc6, оснащен двумя аzipодами корпорации «ABB», мощностью 10.0 МВт каждый. На сегодняшний день это судно имеет наибольшую суммарную мощность аzipодов [10]. На проекте «Ямал СПГ» будет использована концепция трех аzipодов мощностью 45 МВт. Можно предположить, что возможности новых газозовов при плавании в тяжелых льдах будут значительно превосходить возможности существующих ледоколов [12].

Механизм работы струи зависит от следующих факторов: диаметра винта, равного 5,6 м, осадки судна кормой – 9,6 м, мощности одного аzipода – 10000 МВт (13000 л. с.) Мощность в 100 л. с. создает упор примерно в 1 т. При уменьшении осадки кормой до 8,6 м верхняя кромка струи входит в контакт со льдом при его толщине 3 м от поверхности воды. Поскольку корма судна имеет овальную форму, наблюдается выход струи на поверхность в районе кормы за счет разности угловых скоростей потока у корпуса и в воде на глубине. За счет трения о корпус скорость в верхней части потока меньше, чем в нижней его части, происходит загиб струи с выходом ее на поверхность. Работая двумя аzipодами, направляя их в одну точку, суммируют их мощности, по 13000 л. с. каждый, и получают примерно 260 т нагрузки на лед площадью примерно 20 м².

Для развития концепции вращающихся аzipодов или изменения угла установки существующих (рис. 2) необходим расчет процесса разрушения льда струей воды от аzipодов с изменением угла атаки на лед в пространстве и времени, что приводит к искусственному созданию *эффекта зыби*. Действие потока воды и тем более влияние его на ледовые образования изучены слабо, ввиду отсутствия опыта практического применения. Вместе с тем, существует теория волновых колебаний ледяного покрова, которую, с нашей точки зрения, целесообразно использовать применительно к решению задачи разрушения льда изгибно-гравитационными волнами. Такие волны формируются от движущейся по льду нагрузки (струи) вследствие вращения аzipодов при движении транспортных судов во льдах Арктики.

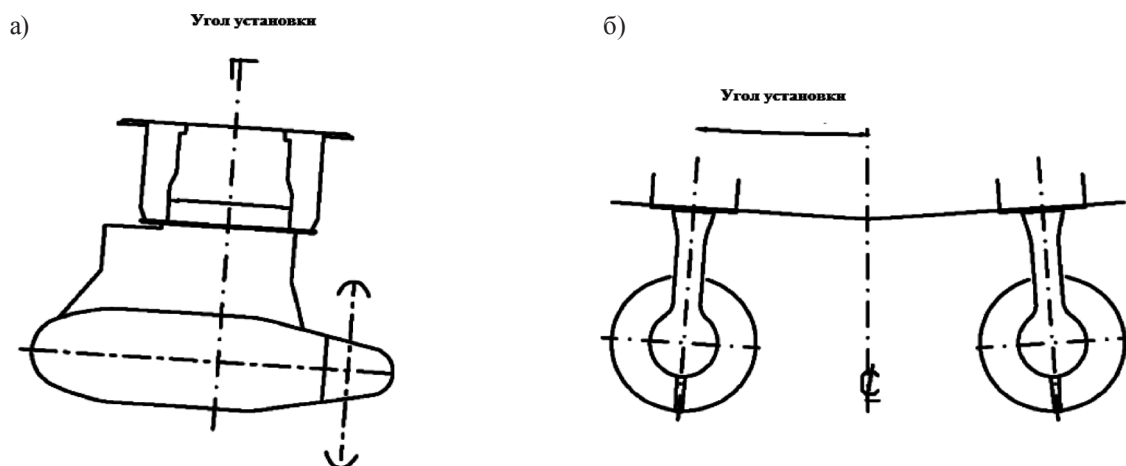


Рис. 2. Монтажные углы: продольный (а) и боковой (б)

Отмеченные ранее наблюдения имеют место при плавании в суровых, толстых и заторошенных льдах Арктики. При движении по ровному ледяному полю средней толщины судно движется носом гораздо быстрее, чем кормой за счет ледовой конфигурации носа и массы судна. Однако при появлении заторошенного льда толщиной 3 м и более исчезает способность двигаться носом,

но благодаря азиподам появляется возможность следовать кормой. Движение осуществляется со значительной потерей скорости, что компенсируется устойчивостью продвижения во льду.

Натурные наблюдения за механизмом воздействия потока воды от струи азипода на ледовые образования, в особенности на заторошенные поля, проведенные в условиях Арктики, подтверждаются опытными испытаниями в бассейне (рис. 3). Струя, вытекающая в массу однородной жидкости, постепенно расширяется и на некотором расстоянии от насадки рассеивается в ней. Струя состоит из ядра струи, скорость в котором постоянна, и турбулентного слоя, в котором происходит перемешивание основной массы струи с окружающей ее неподвижной жидкостью. Это приводит к затормаживанию движения струи и увеличению ее массы за счет вовлечения жидкости извне. По мере утолщения пограничного слоя ядро струи сужается. На некотором расстоянии от выхода струи оно исчезает и вся струя оказывается охваченной пограничным слоем. В рассматриваемом случае основной интерес представляет длина ядра струи, в которой скорость движения равна скорости на выходе потока из струи, и как следствие, воздействие струи на лед с усилием, создаваемым азиподом без потери мощности. Многочисленные расчеты показали, что длина ядра струи равна примерно шести его диаметрам⁴.

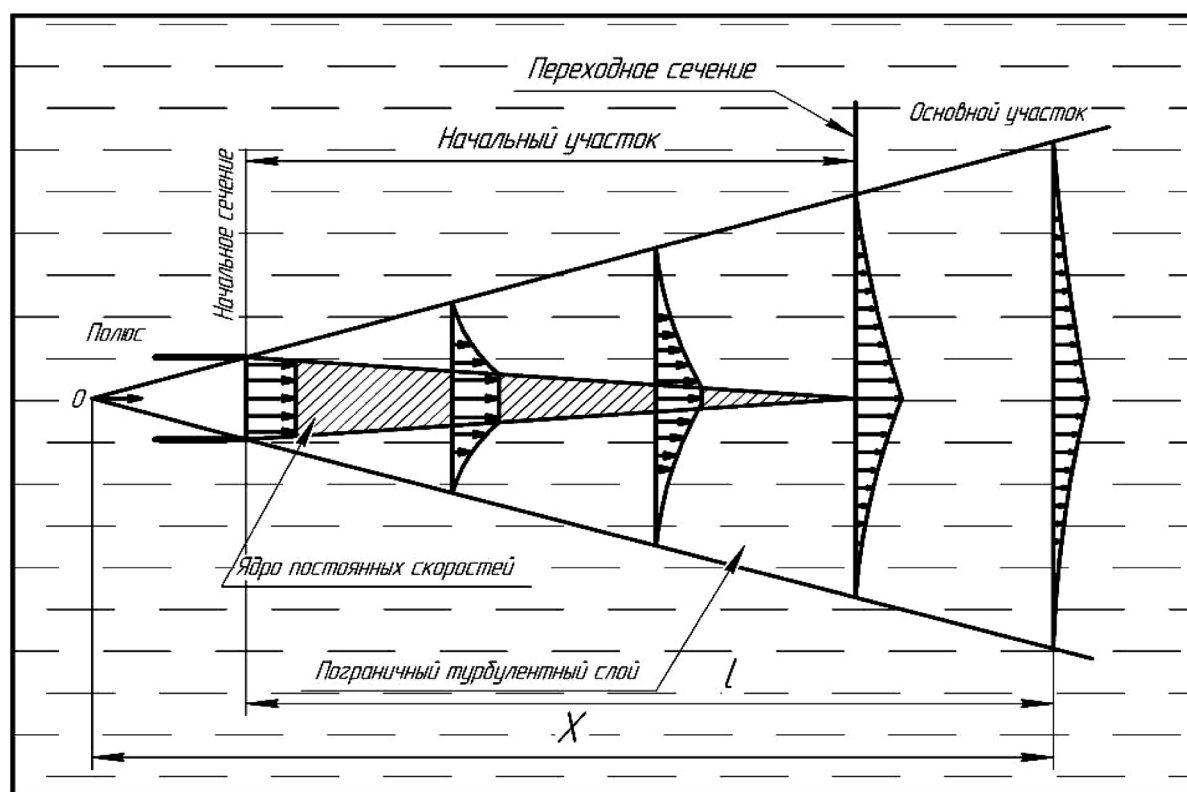


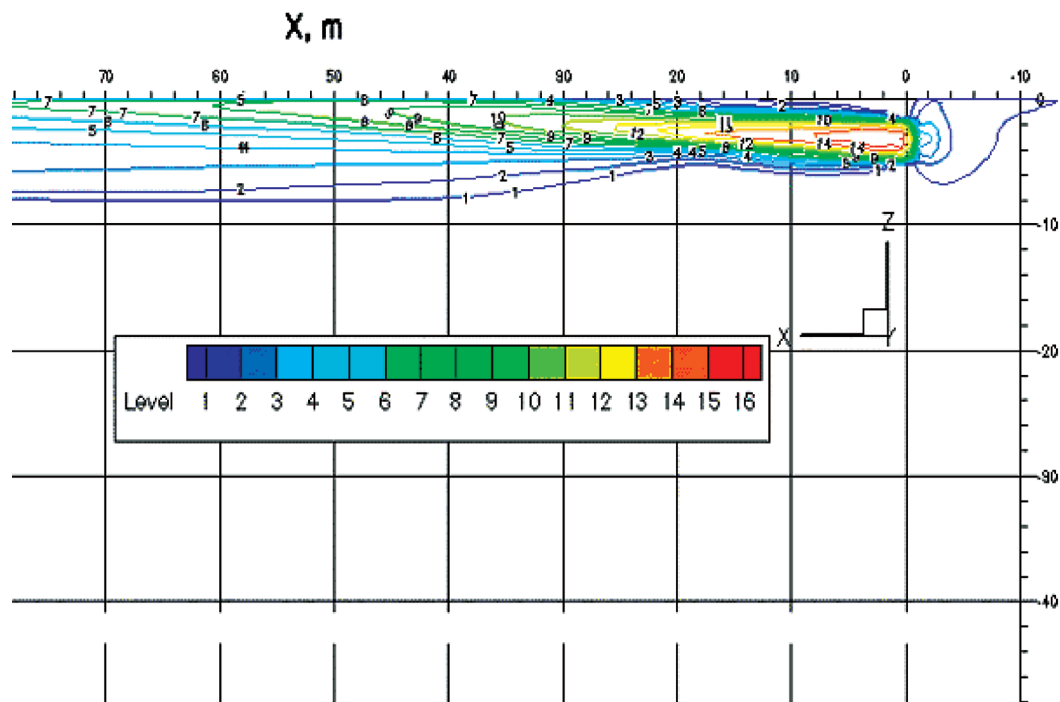
Рис. 3. Сечение затопленной струи

В ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова проводились исследования влияния струи азиподов и потери их мощности за счет влияния корпуса при установке на буровую платформу при работе в режиме динамического позиционирования [14], [15]. Диаметр винта принимался равным 3,6 м.

На эпюрах рис. 4 наглядно видно подтверждение приведенных ранее наблюдений, которое дает основание полагать, что танкер типа «Василий Диньков» с диаметром винта 5,6 м имеет ядро струи или поле постоянных скоростей в районе 30 м. При осадке судна, равной 14 м, следует отметить, что сила потока на поверхности воды будет равна максимальному упору винта при направлении струи вверх с помощью придания судну крена на один из бортов.

⁴ Справочник по гидравлическим расчетам. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1972.

а)



б)

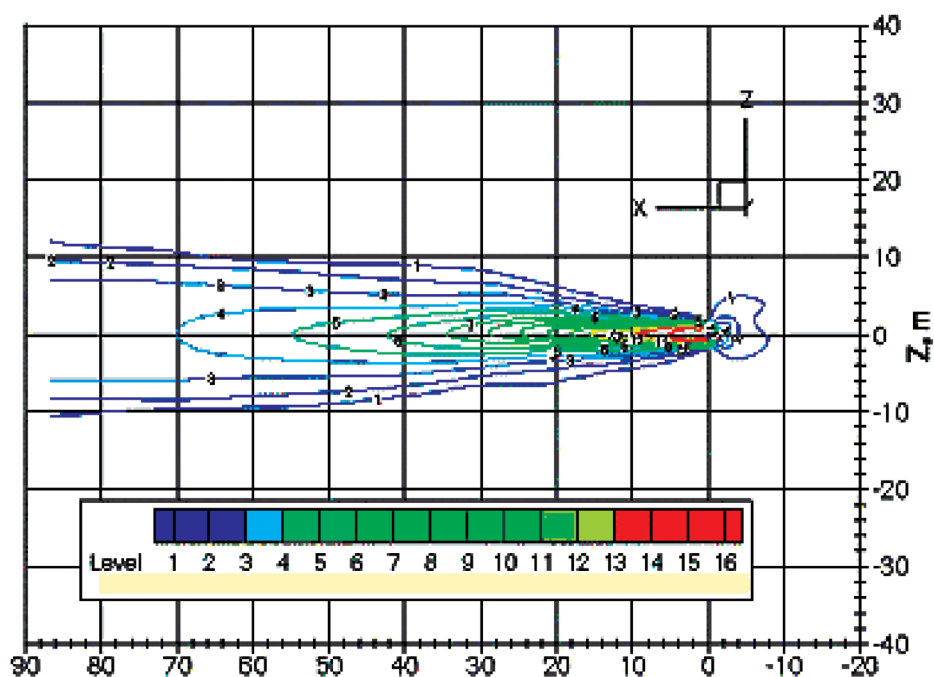


Рис. 4. Распределение осевой скорости V_x от пропеллера вблизи платформы (а) и распределение скоростей в струе от пропеллера (б)

Исходя из ранее изложенного, можно сделать вывод о том, что азиподы являются хорошим инструментом для борьбы со льдом. Наличие рассматриваемого эффекта от азиподов подтверждается следующим фактом: при работе азипода в поток вовлекаются куски льда извне, которые выбрасываются вместе со струей со скоростью около 10 м/с, оказывая точечное воздействие на ледяные поля, приводя их в разрушение по принципу пескоструя. Именно этот процесс объясняет причину обнаружения после плавания кормой в Печорском море у танкеров проекта «Варандей»

многочисленных вмятин в их кормовой части от обломков льда, сбрасываемых на корпус, что требует принятия мер по усилению корпуса судна в корме.

Развитие техники и новых технологий позволило судам иметь достаточную мощность и надежный корпус для осуществления круглогодичного плавания в суровых льдах Арктики. Основным препятствием в Арктике для нынешнего поколения судов служат торосы, наиболее эффективным средством для преодоления которых по сравнению с многократными набегами корпусом на препятствие является направленная струя от азипода. Торос, формируемый под воздействием внешних факторов, состоит из паруса и киля, которые к концу зимы достигают значительных размеров и становятся непреодолимым препятствием для современных ледоколов. Вместе с тем, консолидированная нижняя часть тороса находится под водой и является наиболее слабой в плане ледопроеходимости. Делая набег на торос, ледокол спрессовывает по вертикали и собирает по горизонтали ледяные фрагменты, тем самым ухудшая ситуацию. Вследствие этого следующий разбег уже приходится делать на больших скоростях или изменять тактику прохода, что значительно увеличивает затраты как по времени, так и по мощности.

Использование методики разрушения тороса струей азипода позволяет устранить необходимость прохождения набегам. Размывание тороса значительно ослабляет несущие способности льда за счет как механического, так и термического разрушения силой потока жидкости. Понижение температуры льда вследствие обмыва более теплой водой также способствует ослаблению льда под напором тяжести выгнанной на него воды через образовавшиеся трещины. При этом процесс разрушения наблюдается с рулевого мостика, что позволяет держать под контролем данный процесс и действовать оперативно без потерь времени и усилий. Поскольку при «набегах» ледоколом не видно, что происходит в носовой части, действуют интуитивно. Торосистые гряды могут простираться на многие мили и занимать значительные площади, вплоть до полной затопленности отдельных ледяных полей, т. е. наблюдается так называемый *жатый лед*, и здесь без ранее изложенного метода движения никак не обойтись.

Используя прессиометрический метод исследования грунтов, финские специалисты провели обследование торосов на предмет их прочности. Эти изыскания проводились в 90-е гг. XX в. в Охотском море. Скважины бурились в районе паруса тороса для оценки прочностных характеристик на различных горизонтах от поверхности: 0,6; 1,2; 2,0; 3,0; 4,0; 4,7 м. На основании расчета усилий по разрушению льда были получены следующие данные: на глубине 0,6 м от уровня воды прочность на сжатие R_c составила 3,2 МПа, а на глубине 4,7 м – 0,4 МПа. Полученные результаты наглядно показывают, что прочность льда с глубиной значительно снижается и это подтверждается практическим использованием метода разрушения льда снизу [17].

Выводы:

- процесс разрушения льда с использованием азиподов позволяет разрушать лед снизу, а не сверху, как было принято до сих пор, что дает возможность добиваться результата с использованием меньшей мощности;
- изменения угла наклона вертикальной оси установки азипода в корпусе судна позволяют изменить плоскость направления вращения азипода, благодаря чему снижается потеря мощности от влияния корпуса. При работе винтами «внутрь» мощность теряется за счет скега, установленного между азиподами. Изменение угла выхода струи на поверхность воды способствует усилению воздействия на ледяные образования;
- можно предположить, что в случае установки трех азиподов на танкерах-газовозах, строящихся для проекта «Ямал СПГ» [12], для получения описанного эффекта потребуется задействовать два бортовых азипода.

Список литературы

1. Макаров С. Ледокол Ермак / С. Макаров, Н. Кузнецов, С. Долгов. — М.: Паулсен, 2010. — 672 с.
2. Блинов В. М. Ледокол Ленин. Первый атомный / В. М. Блинов. — М.: Паулсен, 2009. — 288 с.
3. Доронин Ю. П. Физика океана / Ю. П. Доронин. — СПб: РГТМУ, 2000. — 305 с.
4. Визе В. Моря российской Арктики / В. Визе. — М.: Европейские издания, 2008. — 664 с.
5. Смирнов В. Н. Динамика процесса разлома дрейфующего ледяного поля станции Северный полюс-38 / В. Н. Смирнов, Л. В. Панов, В. Т. Соколов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 4. — С. 26–45.
6. Степанюк И. А. Методы измерений характеристик динамики ледяного покрова / И. А. Степанюк, В. Н. Смирнов. — СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — 135 с.
7. Смирнов В. Н. Особенности динамики и механики деформирования льда Арктического бассейна / В. Н. Смирнов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2007. — № 75. — С. 73–84.
8. M. Sc. THESIS Control Strategies for Maneuvering in Ice Ridge and Multi Ice Regimes., Sindre Ueland & Sverre Slettebo, Trondheim. — 2010. — P. 1–5.
9. Jürgens D. Design Thrusters using CFD / D. Jürgens, M. Palm, A. Amelang, T. Moltrecht // DP Conference. Houston. — October, 7–8, 2008. — P. 1–8.
10. Azipod VI Series Product Introduction . — Helsinki: ABB Oy Marine, 2010. — 36 с.
11. Developing the First Arctic LNG fleet // Arctic Passion News. — 2012. — № 7. — P. 7–9.
12. Цой Л. Г. Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газовозов для Арктики / Л. Г. Цой, А. В. Андрияшин, А. А. Штрек // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 3. — С. 46–57.
13. Марченко А. В. Модели торошения морских льдов [Электронный ресурс] / А. В. Марченко. — Режим доступа: <http://www.rusmechanics.ru/3/articles/marchenko> (дата обращения — 20.03.2015). — 20.03.2015.
14. Moukhma L. A. Computation of counterrotating propellers steady and unsteady characteristics / L. A. Moukhma, A. Yu. Yakovlev // ISC'2002 Proceedings, St-Petersburg, Russia, 2002. — P. 137–144.
15. Яковлев А. Ю. Расчет стационарных гидродинамических характеристик тянущей винторулевой колонки / А. Ю. Яковлев // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2008. — Вып. 35 (320). — С. 96–110.
16. Mikko Mattila & Jari Ylitalo. The reliable solution with minimal Thrust Losses / Mikko Mattila & Jari Ylitalo // Dynamic positioning conference. — Finland, September, 17–18. — 2002. — P. 1–9.
17. Сальников А. В. Нефтегазовые трубопроводы на арктическом шельфе: в 2 ч. — Ч. 2. Ледовое воздействие: метод. указания / А. В. Сальников. — Ухта: УГТУ, 2013. — 44 с.

УДК. 656.61.052

В. В. Дерябин,
канд. техн. наук

НЕЧЁТКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА СКОРОСТИ ДРЕЙФА СУДНА

FUZZY INFERENCE VESSEL'S DRIFT SPEED PREDICTION SYSTEM

В статье рассматривается построение нечёткой системы, прогнозирующей скорость дрейфа судна. Входной сигнал составляют величины, характеризующие движение судна в условиях влияния ветра и волнения, режим работы его движительно-рулевого комплекса. Предлагается методика получения набора значений векторов входного и выходного сигналов, которая может использоваться в процессе текущей эксплуатации судна. Формирование эталонных ситуаций для создания базы правил системы и проверки её работоспособности выполняется с использованием имитационной модели движения судна. Приводятся результаты тестирования нечёткой системы в различных навигационных ситуациях, характеризующихся определёнными значениями возмущающих и управляющих воздействий. В рассмотренных модельных ситуациях синтезированная система позволяет определять траекторию движения судна с приемлемой для навигационных целей средней точностью.

In the article fuzzy inference vessel's drift speed prediction system is considered. Input signal is formed by variables which perform vessel's motion in wind and wave disturbances, its propulsion and steering system mode. Method of registration of input and output vector values which is applicable during routine vessel's operation is proposed. Forming necessary sets for creating rules base and validation of system is performed on basis of imitation model of ship motion. The results of fuzzy inference testing in different navigational situations characterized by certain values of control and disturbance influences are performed in the paper. In considered model situations constructed system demonstrates applicable for navigational purposes mean trajectory prediction accuracy.

Ключевые слова: система нечёткого вывода, скорость дрейфа судна, имитационная модель, численные пути, тестирование.

Key words: fuzzy inference system, vessel speed of drift, imitation model, dead reckoning, testing.

ЗАДАЧА прогнозирования скорости дрейфа судна возникает при ведении счисления пути, когда в качестве автономной навигационной системы используется относительный лаг, измеряющий только продольную составляющую скорости, и гироскоп. Традиционный подход к решению этой задачи состоит в применении аппарата теории дифференциальных уравнений. Однако правые части этих уравнений содержат в своих слагаемых силы, воздействующие на корпус судна со стороны движительно-рулевого комплекса, ветра, волнения и течений, а также силы сопротивления. Методики вычисления данных сил основаны на положениях той или иной теории либо вычисления выполняются на основе обработки данных испытаний моделей судов. В том и другом случае способ расчёта может не соответствовать действительности при моделировании динамики конкретного судна.

В связи с этим особое значение приобретает разработка альтернативных методов прогноза дрейфа судна. В настоящей статье предлагается построение модели прогноза скорости дрейфа на основе системы нечёткого вывода. Рассмотрена методика проведения натурного эксперимента, по результатам которого выполняется идентификация модели, а также приводятся результаты тестирования нечёткой системы при движении судна в различных условиях плавания.

При ведении счисления измерение исходных величин происходит в условиях значительной неопределённости. Так, параметры волнения (длина, высота, курсовой угол волн) определяются лишь приближённо, на основе визуальной оценки. Нечёткие модели как раз и ориентированы на построение на их основе систем, работающих в условиях существенной неопределённости и неполноты исходных данных.

Определим сначала вид входных и выходных сигналов системы нечёткого вывода. Для имитации движения судна в условиях влияния ветра и волнения используется предложенная в статье [1] модель движения судна в горизонтальной плоскости. В соответствии с указанной моделью дифференциальное уравнение для скорости дрейфа судна имеет следующий вид:

$$m \cdot (1 + k_{22}) \cdot \frac{dV_{y1}}{dt} = -m \cdot (1 + k_{11}) \cdot V_{x1} \cdot \omega + F_{vy1} + F_{py1} + F_{ry1} + F_{ay1} + F_{wy1}, \quad (1)$$

где m – масса судна; V_{x1} – продольная составляющая относительной скорости судна; V_{y1} – скорость дрейфа; ω – угловая скорость поворота; k_{11} , k_{22} – коэффициенты присоединённых масс; F_{y1} – проекция сил на поперечную ось, а их индексы относятся: v – к силам и моментам вязкостного трения, P – к поперечной силе гребного винта, R – к влиянию руля; A , W – индексы, характеризующие воздействие ветра и волнения.

Анализ уравнения (1) и выражений для расчёта отдельных сил показывает, что его непосредственное интегрирование приводит к тому, что выходная величина $Y = V_{y1}$ (скорость дрейфа судна) зависит от интеграла суммы слагаемых правой части. В соответствии с этим в конце промежутка времени длительностью Δt значение выходного сигнала будет зависеть от входа, имеющего следующий вид:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 = \int_0^{\Delta t} V_{x1} dt; \\ x_2 = \int_0^{\Delta t} V_{y1} dt; \\ x_3 = \int_0^{\Delta t} (V_{x1} w) dt; \\ x_4 = \int_0^{\Delta t} \delta dt; \\ x_5 = \int_0^{\Delta t} n dt; \\ x_6 = \int_0^{\Delta t} V_R^2 \sin \alpha_R dt; \\ x_7 = \int_0^{\Delta t} pg(h^2 / \lambda) \sin \gamma dt, \end{pmatrix}$$

где δ – угол перекадки руля; n – число оборотов винта; V_R , α_R – соответственно скорость и курсовой угол относительного ветра; p – плотность воды; g – ускорение свободного падения; h – высота волны; λ – длина волны; γ – угол между направлением, противоположным бегу волн, и диаметральной плоскостью судна.

Первым этапом построения системы нечёткого вывода является формирование её базы правил [2]. Нечёткая система имеет семь входных и одну выходную лингвистических переменных. В ней используется система правил нечётких продукций следующего типа:

$$\text{ЕСЛИ } x_1 = x_1^* \text{ И } x_2 = x_2^* \text{ И } x_3 = x_3^*, \dots, \text{ И } x_7 = x_7^* \text{ ТО } y = y^*(F), \quad (2)$$

где символом $*$ обозначены конкретные значения компонентов входного и выходного сигналов, а F – вес соответствующего правила. Выбор логической операции «И», связывающей посылки правил, объясняется тем, что составляющие вектора входного сигнала оказывают совместное влияние на величину скорости дрейфа судна. Назначение веса F каждого правила может исходить из степени надёжности информации, на основе которой было сформировано данное правило. Считая все измерения равноточными, будем в выражении (2) величине веса приписывать значение, равное единице.

Вторым этапом синтеза системы является фаззификация лингвистических переменных. Причем каждая лингвистическая переменная характеризуется N_i термами, с каждым из которых сопоставляется определённая функция принадлежности. На рис. 1 приведены графики функций принадлежности для семи термов лингвистической переменной x_1 , область возможных значений которой представлена промежутком $[x_{1\min}, x_{1\max}]$. Для терма «1», соответствующего наименьшему значению лингвистической переменной, назначается Z-образная функция принадлежности, для терма «7» – S-образная. Все остальные термы характеризуются треугольными функциями принадлежности. Выбор типа функций принадлежности выполнен с учётом практики синтеза нечётких регулирующих устройств, рассматриваемых в [3] – [7].

Агрегирование условий в правилах нечётких продукций осуществляется с использованием операции нечёткой конъюнкции «ИЛИ», т. е. если хотя бы одна посылка в каком-либо правиле имеет степень истинности, отличную от нуля, то это правило считается активным и используется при дальнейших расчетах. Активизация подзаключений в правилах нечётких продукций представляет собой min-активизацию, причём для ускорения расчётов используются лишь активные правила.

Аккумуляция заключений нечётких правил осуществляется по формуле для объединения нечетких множеств, которые относятся к термам подзаключений для одних и тех же лингвистических переменных [2]. Дефазификация выходной переменной выполняется с использованием метода центра тяжести. Следует отметить, что рассматриваемая система нечёткого вывода построена по алгоритму Мамдани, который был предложен английским учёным Е. Мамдани в 1975 г. [8].

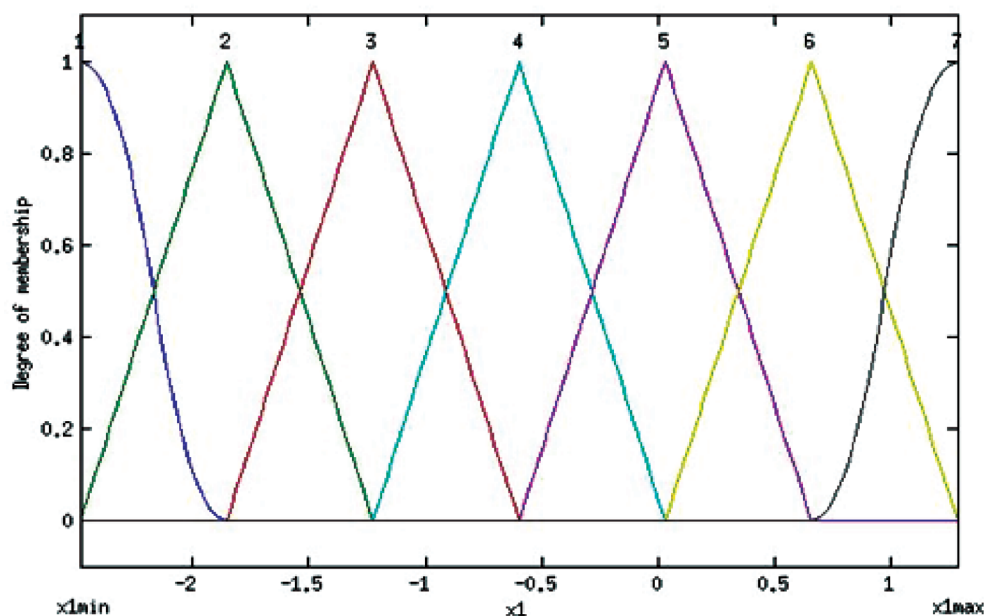


Рис. 1. Графики функций принадлежности термов лингвистической переменной x_1

После того как структура системы полностью определена, можно приступить к формированию базы правил нечётких продукций на основе данных, полученных по результатам проведения натурных наблюдений. Каждая лингвистическая переменная, как входная, так и выходная, принимает значение, соответствующее определенному терму. Степень соответствия переменной определяется модулем разности между её фактическим значением и величиной, в которой функция принадлежности того или иного терма принимает наибольшее значение. Например, если входная переменная x_1 принимает значение, равное $-0,5$, то по рис. 1 можно определить, что она относится к терму «4». Таким образом, в результате рассмотрения конкретной эталонной ситуации можно сформировать набор номеров для всех термов переменных системы. В среде MATLAB R2014b правила нечётких продукций хранятся в виде матрицы, каждая строка которой соответствует определённому правилу. Первый элемент в строке соответствует первому входу, второй – второму и т. д. После указанных элементов следует номер терма выходного сигнала. Иными словами, на основе обработки данных эталонных ситуаций формируется «матрица правил» системы нечеткого вывода, элементы которой принимают целые значения от 1 до N_i .

Для построения базы правил системы необходим набор эталонных ситуаций (X, Y), на основе которого формулируются правила нечёткого вывода. Возможны два пути формирования указанных ситуаций. Первый заключается в накоплении определённого количества различных пар «вход-выход», наблюдаемых в ходе длительной эксплуатации судна. Применение такого подхода на практике возможно, так как вид входных и выходных сигналов позволяет проводить независимые во времени наблюдения, результаты которых можно хранить в виде базы данных. Второй путь предполагает проведение натурных испытаний по определённой программе, содержащей инструкции по управлению судном в тех или иных условиях плавания. В [9] предлагается проведение подобных испытаний на основе модельных ситуаций, каждая из которых представляет собой плавание судна с удерживаемыми постоянными значениями угла перекладки руля и числа оборотов винта.

При формировании базы правил системы нечёткого вывода следует учитывать два обстоятельства. Первое из них состоит в том, что число правил не должно быть слишком большим, так как увеличение их количества приводит к снижению скорости вычислений системы. Второе заключается в том, что используемые правила должны отображать основные свойства судна как динамической системы. Указанные два условия противоречивы и нахождение оптимального соотношения между количеством и качеством эталонных сигналов возможно при помощи использования результатов моделирования динамики конкретного судна.

Приступим к моделированию условий плавания, среди которых наблюдаются различные варианты движения судна в ходе его продолжительной эксплуатации. Введём понятия гидрометеорологической и навигационной ситуаций – соответственно ГС и НС. Под ГС понимается совокупность характеристик ветра и волнения в неподвижной географической системе координат, которыми эти внешние факторы определяются безотносительно к судну. Такими характеристиками являются направление и скорость истинного ветра, направление распространения волн, их длина, высота и истинный период. Воздействие ветра и волнения на конкретное судно определяется его гидро- и аэродинамикой, а также величинами действующих на него управляющих воздействий – сил со стороны руля и винта. НС есть совокупность относительных характеристик ветра и волнения, а также управляющих воздействий, определяющих движение судна. Иными словами, НС характеризуется совокупностью возмущающих воздействий (ВВ) и управляющих воздействий (УВ) на судно. К относительным характеристикам внешних факторов относятся курсовой угол и скорость относительного ветра, курсовой угол волны, длина и высота волн, их кажущийся период.

Рассмотреть все навигационные ситуации принципиально невозможно, поэтому следует ограничиться лишь их возможными вариантами, для формирования которых необходима классификация навигационных ситуаций. В её основу положен принцип постоянства во времени управляющих и возмущающих воздействий. С позиции данного принципа возможны четыре варианта НС:

1. УВ изменяются, и ВВ изменяются с течением времени.
2. УВ изменяются, а ВВ постоянны во времени.
3. УВ постоянны во времени, а ВВ изменяются.
4. УВ постоянны во времени, и ВВ постоянны во времени.

Согласно [9], рассмотренные варианты навигационных ситуаций можно объединить в три класса, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Классы навигационных ситуаций

Номер класса	Характеристика	Правила моделирования навигационной ситуации
I	ВВ приближённо постоянны, а УВ могут как изменяться, так и нет (в зависимости от настройки системы управления на курсе)	ГС постоянна. Судно удерживается на заданном курсе, обороты винта постоянны
II	УВ постоянны во времени, а ВВ изменяются	ГС постоянна или носит переменный характер. Задаётся число оборотов винта и угол перекладки руля, которые остаются неизменными во время плавания судна
III	УВ и ВВ изменяются с течением времени	ГС постоянна или носит переменный характер. Число оборотов винта и угол перекладки руля изменяются в течение времени по определённому закону

При моделировании навигационных ситуаций первого класса следует рассмотреть структуру системы автоматического регулирования курса судна. В настоящем исследовании используется ПИД-регулятор, коэффициенты которого определяются с учётом характеристик: постоянной времени и коэффициента усиления, а также скорости движения судна [10], [11].

Методика моделирования гидрометеорологической ситуации состоит в следующем. В случае её постоянного характера, параметры действующих на акватории ветра и регулярного волнения выбираются случайным образом в соответствии с табл. 2 и сохраняются постоянными по мере плавания судна в данной модельной ситуации.

Таблица 2

Параметры гидрометеорологической ситуации

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Промежуток возможных значений
Направление истинного ветра	K_{tr}	°	[0; 360)
Скорость истинного ветра	V_{tr}	м/с	[0; 30]
Направление волнения (откуда приходят волны)	K_w	°	[0; 360)
Длина волны	λ	м	[10; 250]
Высота волны	h	м	[0; 10]

Регулярное волнение моделируется на основе линейной теории волн, существенным допущением которой является предположение о малости крутизны волны h / λ . В настоящем исследовании значение крутизны не превышает 0,1. Связь между длиной волны и её истинным периодом τ выражается следующей зависимостью:

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}.$$

Переменный характер гидрометеорологической ситуации выражается в том, что величины, характеризующие ветер и волнение, изменяются во времени по следующему закону:

$$x(t) = x_0 + A_1 \sin(2\pi t / \tau_1) + A_2 \sin(2\pi t / \tau_2) + A_3 \sin(2\pi t / \tau_3), \quad (3)$$

где x_0 – среднее значение моделируемой величины, выбираемое случайным образом в соответствии с табл. 2; $A_1, A_2, A_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3$ – соответственно амплитуды и периоды первой, второй и третьей гармоник.

Границы возможных значений данных величин приведены в табл. 3. Предполагается, что при моделировании в соответствии с выражением (3) значения величин находятся в промежутках, границы которых указаны в табл. 2.

Таблица 3

Характеристики изменяющихся гидрометеорологических факторов

Наименование величины	Обозначение	Единицы измерения	I гармоника		II гармоника		III гармоника	
			A	τ	A	τ	A	τ
Модуль истинного ветра	V_{tr}	м/с	[0; 30]	2–10 ч	[0; 5]	10 мин – 1 ч	[0; 2]	10 с – 1 мин
Направление истинного ветра	K_{tr}	град.	[0; 360]	*	[0; 30]	*	[0; 10]	*
Высота волны	h	м	[0; 5]	**	–	–	–	–
Направление волнения	K_w	град.	[0; 90]	***	–	–	–	–
Длина волны	λ	м	[30; 100]	1–10 ч	–	–	–	–

* – период направления ветра может отличаться для соответствующих гармоник от его модуля не более, чем соответственно, на 1 ч, 1000 и 30 с.

** – период изменения высоты волнения может отличаться от периода изменения первой гармоники модуля истинного ветра на величину, не превосходящую по модулю 1 ч.

*** – период изменения направления волнения может отличаться от периода изменения первой гармоники направления истинного ветра на величину, не превосходящую по модулю 1 ч.

При моделировании навигационной ситуации третьего класса следует предположить, что угол перекладки руля и число оборотов винта изменяются в соответствии с выражениями:

$$\delta(t) = 35^\circ \sin(2\pi t / \tau_\delta); \quad (4)$$

$$n(t) = 40 \text{ об./мин} + 40 \text{ об./мин} \times \sin(2\pi t / \tau_n),$$

где τ_δ и τ_n – соответственно периоды изменений угла перекладки руля и числа оборотов винта (значения данных величин выбираются в соответствии с ограничениями движительно-рулевого комплекса судна).

Если скорость перекладки руля составляет 3 град./с, то 47 с – наименьшее значение величины τ_δ . Если обороты винта могут измениться на максимальную величину (80 об/мин) в течение 5 мин, то 10 мин – минимальное значение периода τ_n . Наибольшие значения периодов в выражении (4) выбираются равными удвоенному времени плавания.

Для навигационной ситуации первого класса значение курса, удерживаемого авторулевым, выбирается случайным образом из промежутка от 0 до 360°, значение оборотов винта – из диапазона 40–80 об/мин. При моделировании навигационной ситуации второго класса значение числа оборотов винта выбирается из промежутка от 0 до 80 об/мин, угол перекладки руля – из диапазона -35 – +35.

Прежде чем приступить к имитации движения судна в различных условиях плавания, необходимо определиться с выбором промежутка времени Δt , в течение которого происходит интегрирование величин, формирующих входной сигнал нечёткой системы. Величина данного промежутка в настоящей работе принимается равной 5 мин. Кроме того, необходимо выбрать количество наблюдений, в ходе которых формируются образцы. Каждое наблюдение представляет собой плавание судна в течение одного часа в определённых условиях. В данном исследовании было решено использовать 1000 таких часовых наблюдений.

Навигационные ситуации второго и третьего класса имеют ещё по два подкласса, соответствующих постоянному или переменному характеру гидрометеорологической ситуации. Было рассмотрено 200 навигационных ситуаций первого класса и по 200 ситуаций каждого подкласса НС второго и третьего классов. Моделирование движения судна выполнялось с использованием параметров балкера серии «584Е» водоизмещением 31795 т при осадке по летнюю грузовую ватерлинию.

Как отмечалось ранее, при формировании вариантов навигационных ситуаций возникает проблема их классификации, имеющая некоторые особенности. Одна заключается в том, что в процессе эксплуатации судна могут встречаться образцы, «похожие» друг на друга, их компоненты отличаются незначительно, и влияние на скорость дрейфа таких сигналов можно считать практически эквивалентным. Поскольку подобные «близкие» сигналы образуют определённый класс, для формирования системы правил следует ограничиться только одним представителем такого класса. Другая особенность классификации состоит в том, что теоретически следует рассмотреть все возможные классы, но на практике, как правило, приходится ограничиваться только их конечным числом. Возникает следующий вопрос: «Какие классы должны быть рассмотрены обязательно, а какими можно пренебречь, чтобы обеспечить гарантированную точность системы?» Для ответа на него зададимся следующими условиями: пусть каждый компонент входного сигнала принимает значение, принадлежащее одному из семи классов, центральными точками которых служат точки максимума функций принадлежности соответствующих термов. В таком

случае насчитывается $7^7 = 823543$ возможных классов для вектора входного сигнала. В ходе рассмотренных 1000 модельных ситуаций было сформировано 1708 входных образцов, соответствующих такому же количеству классов. Распределение входных сигналов по классам приведено на рис. 2, откуда видно, что несмотря на значительное число рассмотренных ситуаций, их распределение по классам носит неравномерный характер.

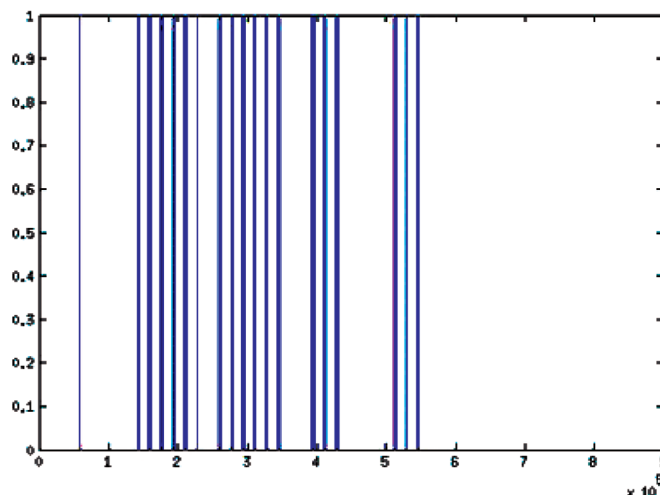


Рис. 2. Распределение векторов входного сигнала по классам

На основе полученных образцов была сформирована база правил нечётких продукций, после чего построение нечёткой системы можно считать завершённым. Тестирование системы нечёткого вывода выполняется с использованием имитационной модели движения судна по методике, используемой для формирования эталонных ситуаций. Единственным отличием при этом является то, что количество навигационных ситуаций выбирается равным ста. Особенность использования нечёткой системы в рабочем режиме состоит в том, что входной сигнал x^2 представляет собой интеграл от скорости дрейфа, т. е. выхода системы. Для расчёта указанного сигнала используются спрогнозированные нечёткой системой значения до предыдущего момента времени включительно. Иными словами, синтезированная нечёткая система является рекуррентной.

Точность системы нечёткого вывода может зависеть от количества термов и вида их функций принадлежности. Поэтому были рассмотрены четыре нечёткие системы, лингвистические переменные которых описаны двумя, тремя, пятью и семью термами. Результаты тестирования приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Результаты тестирования нечёткой системы (по скорости)

Класс навигационной ситуации		Количество модельных ситуаций	Точность прогноза скорости							
			Наибольший модуль погрешности, м/с				Средний модуль ошибки, м/с			
		2	Количество термов			Количество термов				
			3	5	7	2	3	5	7	
I		20	2,48	3,33	2,12	2,08	1,62	0,60	0,50	0,58
II	ГС пост.	20	2,28	1,95	1,84	2,49	1,19	0,44	0,40	0,60
	ГС перем.	20	8,71	7,76	7,74	7,85	3,56	0,47	0,53	0,44
III	ГС пост.	20	3,36	3,39	3,33	5,21	1,93	0,69	0,52	0,52
	ГС перем.	20	8,52	7,54	8,87	8,74	3,47	0,65	0,61	0,49
Общий результат		100	8,71	7,76	8,87	8,74	0,70	0,57	0,51	0,52

Таблица 5

Результаты тестирования нечёткой системы (по невязке)

Класс навигационной ситуации		Количество модельных ситуаций	Точность расчёта координат							
			Наибольший максимум невязки, мили				Средний максимум невязки, мили			
		2	Количество термов				Количество термов			
			3	5	7	2	3	5	7	
I		20	10,30	15,1	4,1	10,38	4,13	3,06	1,79	3,2
II	ГС пост.	20	10,67	7,42	6,33	9,2	3,39	2,09	2,18	3,23
	ГС перем.	20	5,79	4,33	5,16	3,31	1,67	1,50	1,63	1,08
III	ГС пост.	20	13,92	8,97	8,50	5,58	2,46	3,06	1,61	1,51
	ГС перем.	20	8,47	6,06	3,97	1,85	2,11	1,60	1,03	0,90
Общий результат		100	13,92	15,1	8,50	10,38	2,75	2,26	1,65	1,99

Результаты тестирования подтверждают предположение о зависимости точности нечёткой системы от количества термов входных и выходных лингвистических переменных. Так как предполагается использование системы для счисления пути судна, то первостепенный интерес представляет именно точность расчёта координат. Наименьшую погрешность в этом отношении демонстрирует система нечёткого вывода, лингвистические переменные которой характеризуются пятью термами. В среднем невязка прогноза траектории составляет 1,65 мили в течение четырех часов плавания. Наибольшее её значение в рассмотренных модельных ситуациях составляет 8,5 миль в течение четырех часов плавания. Что касается прогноза скорости, то лучшие результаты по критерию наибольшего модуля ошибки демонстрирует система, входные и выходные лингвистические переменные которой характеризуются тремя термами.

Следует отметить, что точность прогноза нечёткой системой траектории, как правило, выше в случаях, когда изменение величин, характеризующих гидрометеорологическую ситуацию, носит во времени переменный характер. При этом для скорости дрейфа характерна противоположная ситуация: меньшие значения максимума модуля погрешности её прогноза в рассмотренных модельных ситуациях наблюдаются, как правило, при постоянном характере гидрометеорологической ситуации. Данное явление можно объяснить тем, что задачи прогноза траектории и скорости дрейфа судна представляют собой хоть близкие по цели, но всё же различные задачи. Так, наибольший модуль погрешности скорости дрейфа может принимать большие значения во время плавания в какие-то единичные моменты времени, что в процессе численного интегрирования не окажет существенного влияния на точность счисляемых координат.

Предлагаемый в данной статье вариант использования нечёткой модели для прогноза скорости дрейфа судна основан на алгоритме Мамдани. База правил нечётких продукций формируется на основе эталонных ситуаций, получение которых возможно в ходе натурных наблюдений по мере повседневной эксплуатации судна и основано на классификации вектора входного сигнала. Тестирование нечёткой системы выполнялось на основе 100 модельных ситуаций, характеризующихся различными значениями величин, определяющих управляющие и возмущающие воздействия на судно, а также его кинематических характеристик.

Результаты тестирования показали, что синтезированная нечёткая система позволяет в рассмотренных модельных ситуациях определять траекторию движения судна с приемлемой для навигационных целей средней точностью. При этом предельная ошибка в невязке, фиксируемая в ходе тестирования, достигает значительной величины. Также в результате эксперимента была установлена зависимость погрешности определения при помощи системы параметров движения

судна от количества термов её лингвистических переменных, а также от характера изменения величин, согласно которым формируется входной сигнал. Дальнейших исследований требуют вопросы выбора вида функций принадлежности для термов и их количества, алгоритма формирования базы правил и типа самой нечёткой системы, ответы на которые позволят подойти к решению задачи синтеза нечёткой системы, обладающей заданным уровнем точности. Наиболее перспективными в этом отношении являются гибридные нейронечёткие системы, параметры которых настраиваются в соответствии с особенностями моделируемой динамики объекта.

Список литературы

1. *Дерябин В. В.* Модель движения судна в горизонтальной плоскости / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2013. — № 6. — С. 60–67.
2. *Леоненков А. В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH: науч. изд. / А. В. Леоненков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 736 с.
3. *Грязнов И. Е.* Особенности построения нечеткого регулятора / И. Е. Грязнов, И. Р. Кравченко // Известия ВОЛГГТУ. — 2008. — № 4. — С. 63–66.
4. *Игнатъев В. В.* Применение нечетких регуляторов, в которых в качестве эталонных используются системы управления с промышленными регуляторами / В. В. Игнатъев, И. С. Коберси // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 2 (139). — С. 123–127.
5. *Кудинов Ю. И.* Нечеткие регуляторы и системы управления / Ю. И. Кудинов, И. Н. Дорохов, Ф. Ф. Пашенко // Проблемы управления. — 2004. — № 3. — С. 2–14.
6. *Усков А. А.* Системы с нечеткими моделями объектов управления: монография / А. А. Усков — Смоленск: Изд-во Смоленского филиала Российского ун-та кооперации, 2013. — 153 с.
7. *Riid A.* Transparent Fuzzy Systems: Modeling and Control: PhD Thesis / A. Riid. — Tallinn Technical University: Department of Computer Control. Tallinn (Estonia). — 2002. — 227 p.
8. *Mamdani E. H.* An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller / E. H. Mamdani // Int. J. Man-Machine Studies. — 1975. — Vol. 7. — P. 1–13.
9. *Дерябин В. В.* Прогнозирование скорости дрейфа судна на основе нейронной сети / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2014. — № 5. — С. 3–7.
10. *Fossen T. I.* Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control / Thor I. Fossen. — Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. — 575 p.
11. *Hana S.* Design of a Heading Autopilot for an Oil Tanker / S. Hana, S. Lansing // ECE147C/ME106 Project. — 2007. — № 2. — P. 1–10.

УДК 656.61.052, 551.465.553

Н. Д. Крюков,
асп.;

В. А. Шматков,
д-р техн. наук, проф.

УЧЁТ ТЕЧЕНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВЕТРОМ, ПРИ ПЛАВАНИИ СУДОВ

ACCOUNT OF WIND CURRENTS IN NAVIGATION

Рассмотрены вопросы учёта течений при плавании судов в открытом море, в том числе учёт течений, генерируемых ветром. Описана классическая теория Экмана. Показано, что в течение последнего

времени были достигнуты успехи в вопросе определения влияния ветра на поверхность океана, в частности, получены результаты специальных исследований теории Экмана. На основании представленных экспериментов и исследований разработана уточнённая формула для учёта экмановского течения. Показано, что при учёте течений генерируемых ветром необходимо рассчитывать не только экмановское течение, но также течение, вызванное волновым переносом масс. Предложена новая методика расчёта навигационных характеристик ветровых течений в открытом море, как в поверхностном слое океана, так и на его различных горизонтах, что даёт возможность более точно определить их влияние на объекты, находящиеся как на поверхности, так и в толще воды.

Questions of current registration are observed during vessels sailing in the high sea, in particular registration of wind currents. Classical Ekman theory is described, it is shown that in following time definite success was arrived in questions of wind influence on the ocean surface. Special results of Ekman theory are shown. Based on described experiments and exploring the new formula is suggested for Ekman current registration. It is shown that during wind currents registration it is necessary to calculate not only Ekman current but also currents generated by wave water mass transition. The new method of calculation of navigation characteristic of wind currents on the high sea is proposed as in surface layer like in it different horizons witch give an opportunity to evaluate their influence on objects situated on water surface and also in water depth.

Ключевые слова: теория Экмана, волновое течение, ветровое течение, тангенциальное напряжение, глубина экмановского слоя.

Key words: The Ekman theory, wave current, wind current, tangential stress, depth of Ekman level.

В МОРСКОЙ навигации при ведении счисления и прокладке курса необходимо учитывать внешние факторы, вызывающие снос судна, такие как ветровой дрейф и снос течениями. Как правило, именно течения оказывают наибольшее влияние на расхождение между истинным курсом и путевым углом, а также на разницу между значением скорости, полученным с помощью лага, и фактическим значением скорости судна. При плавании в условиях отсутствия ветра и волнения для определения истинной скорости судна и угла сноса, направление и скорость течения могут быть определены с использованием различных климатических и навигационных пособий [1] – [3] и др., на всем маршруте перехода. Для этого последний делится на зоны в соответствии с изменчивостью течения, и для каждой зоны, в которой скорость и направление течения имеют равные параметры, вносятся коррективы в расчёты скорости и курса судна.

Так как над поверхностью Мирового океана практически постоянно и повсеместно дует ветер, для навигации крайне важно учитывать временные течения, вызванные ветром. Во всех навигационных пособиях ([4] и др.) скорость ветровых течений предлагается рассчитывать по формуле

$$V_0 = \frac{0,0127}{\sqrt{\sin |\varphi|}} U_{10} \varphi \geq 10^\circ, \quad (1)$$

где U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря в м/с; φ – географическая широта в градусах.

При этом угол отклонения ветрового течения от направления ветра принято считать от 18 до 40° вправо в северном полушарии и влево в южном в зависимости от скорости ветра и широты места [3], [4]. Авторство данной формулы неизвестно, но некоторые исследователи отмечают, что данная формула была получена в результате наблюдения за сносом судов. Однако дальнейшие наблюдения показали, что значения, полученные по данной формуле, не отвечают реальным данным, и формула требует уточнения.

Современные исследования вопроса учёта ветрового течения в основном сводятся к математическому моделированию течений в узкостях, мелководьях и замкнутых акваториях [5] – [9], а также описанию различных экспериментов и наблюдений влияния ветра на поверхность океана [7], [8], не предоставляя конечному пользователю конкретного решения для учёта течений, генерируемых ветром.

Течение Экмана. Теоретическое решение для определения скорости течений, генерируемых ветром, было выполнено В. Экманом в начале XX в. [10]. Ученый использовал уравнения движения вязкой жидкости (уравнения Навье – Стокса), решая их при следующих допущениях:

$\rho = \text{const}$ – вода несжимаема, море однородно по плотности;

$v_x \neq 0; v_y \neq 0; v_z = 0$ – рассматривается только движение в горизонтальной плоскости;

$\frac{dv}{dt} = 0$ – течение установившееся;

$U = \text{const}$ – ветер имеет постоянную скорость и направление;

$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y} = 0$ – море безбрежно, поверхность горизонтальна.

Величина тангенциального напряжения постоянна:

$$\left. \begin{aligned} T_{xz} &= \rho A \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ T_{yz} &= \rho A \frac{\partial v_y}{\partial z} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где T_{xz} и T_{yz} – тангенциальное напряжение в направлениях x и y ; ρ – плотность морской воды; A – коэффициент турбулентной вязкости; v_x, v_y – проекции скорости течения на оси OX и OY .

Решение Экмана имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= V_0 \exp(-az) \cos\left(\frac{\pi}{4} - az\right); \\ v_y &= V_0 \exp(-az) \sin\left(\frac{\pi}{4} - az\right). \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

При условии, что ветер дует в северном направлении, $T = T_{yz}$. Входящие в это решение константы равны:

$$V_0 = \frac{T}{\sqrt{\rho^2 f A}}; \quad (4)$$

$$a = \sqrt{\frac{f}{2A}}, \quad (5)$$

где $f = 2\omega \sin \varphi$ — параметр Кориолиса; ω – угловая скорость вращения Земли; φ – географическая широта; V_0 – абсолютная величина скорости течения на морской поверхности.

Следовательно, для расчёта скорости поверхностного ветрового течения необходимо иметь значения параметров T и A (тангенциальное напряжение и коэффициент турбулентной вязкости соответственно).

Тангенциальное напряжение, вызываемое силой трения ветра о поверхность воды, достаточно хорошо изучено, имеет широкое применение в волновых моделях, которые, в свою очередь, имеют высокий уровень корреляции с реальными наблюдаемыми данными, и может быть описано общеизвестной формулой:

$$T = \rho_a U_*^2 \quad (6)$$

где ρ_a – плотность воздуха; U_* – скорость трения (скорость на уровне поверхности воды).

Значение U_* может быть найдено по формуле

$$U_* = U_{10} \sqrt{C_D}, \quad (7)$$

где C_D – коэффициент трения.

Многочисленные экспериментальные исследования коэффициента трения [11], [12] показали, что его зависимость от скорости ветра, измеренной на высоте 10 м, имеет простой вид:

$$C_D = (a + bU_{10})10^{-3}. \quad (8)$$

В модели WAVEWATCH, разработанной в Центре океанического моделирования США в апреле 1999 г., для связи скорости трения со скоростью ветра на высоте 10 м применяется коэффициент трения [11], [13]:

$$C_D = (0,8 + 0,065U_{10})10^{-3}. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции между высотой наблюдаемого волнения и высотой волн рассчитанной по модели WAVEWATCH с использованием формулы (9) составляет более 0,9.

Поскольку скорость течения Экмана убывает с глубиной по экспоненте, то глубина, на которую распространяется течение, может быть выбрана произвольно. Экман предложил считать нижней границей глубину D_E , на которой вектор скорости течения направлен противоположно вектору скорости на поверхности. Это происходит на глубине $D_E = \frac{\pi}{a}$. Таким образом, толщина слоя Экмана определяется по формуле:

$$D_E = \sqrt{\frac{2\pi^2 A}{f}}. \quad (10)$$

Эмпирический эквивалент этой формулы имеет вид [10]:

$$D_E = \frac{7,6}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}, \quad (11)$$

В конце прошлого века были проведены специальные исследования, направленные на изучение вопроса определения скорости ветрового течения. Наиболее значительный вклад внесли исследования ветровых течений, выполненные Р. Уоллером и А. Пледдманном, они проводились на глубине от 2 до 132 м, с использованием 14 измерителей направления течения, установленных на плавающей инструментальной платформе Flip [14]. Е. Ральф и П. Ниилер в течение почти восьми лет отслеживали в Тихом океане 1503 дрейфующих буя, плавучие якоря которых находились на глубине до 15 м. Данные об изменении скорости ветра поступали каждые шесть часов из Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) [15].

Согласно вычислениям Е. Ральфа и П. Ниилера, глубина экмановского слоя и скорость ветрового течения имеют следующий вид [14]:

$$V_0 = \frac{0,0068}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}; \quad (12)$$

$$D_E = \frac{7,12}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}. \quad (13)$$

Как видно из сравнения формул (11) и (13), определяемая по ним глубина слоя Экмана имеет незначительные отличия, в то время как скорость ветрового течения, определяемая по формулам (1) и (12), отличается практически в два раза. Это дает возможность исключить из расчета скорости поверхностного течения коэффициент A , выразив его через D_E , так как значение глубины экмановского слоя определяется просто и достаточно точно из натурных наблюдений.

Решив совместно уравнения (4), (6), (7), (9) и (13), получим аналитическое выражение для расчета поверхностного ветрового течения:

$$V_0 = \frac{\sqrt{2}\pi\rho_a C_D U_{10}^2}{\rho 2\omega \sin \varphi D_E}. \quad (14)$$

Коэффициент корреляции скорости экмановского течения, рассчитанного по формулам (13) и (14), составляет 0,88. Формула (14) даёт возможность вычислять скорость течения при изменении коэффициента трения C_D в зависимости от скорости ветра. Через глубину D_E можно вычислять постоянную a в уравнениях (3), определяя по ним скорость течения на различных глубинах. Это

позволяет более точно определять влияние течения на объект, находящийся как на поверхности, так и в толще воды.

Направление ветрового течения определяется как угол между направлением дующего ветра и направлением течения генерируемого им. Исследования данного вопроса проводили Н. Максименко и П. Ниилер[14]. На основании данных о положении дрейфующих буйев с плавучими якорями, погруженными на глубину 15 м, показаний спутниковых альтиметров, гравиметрии, а также данных проекта GRACE и карт ветров, согласно обновленному анализу NCAR/NCEP, была определена зависимость направления течения от широты, приведенная на рис. 1 [14].

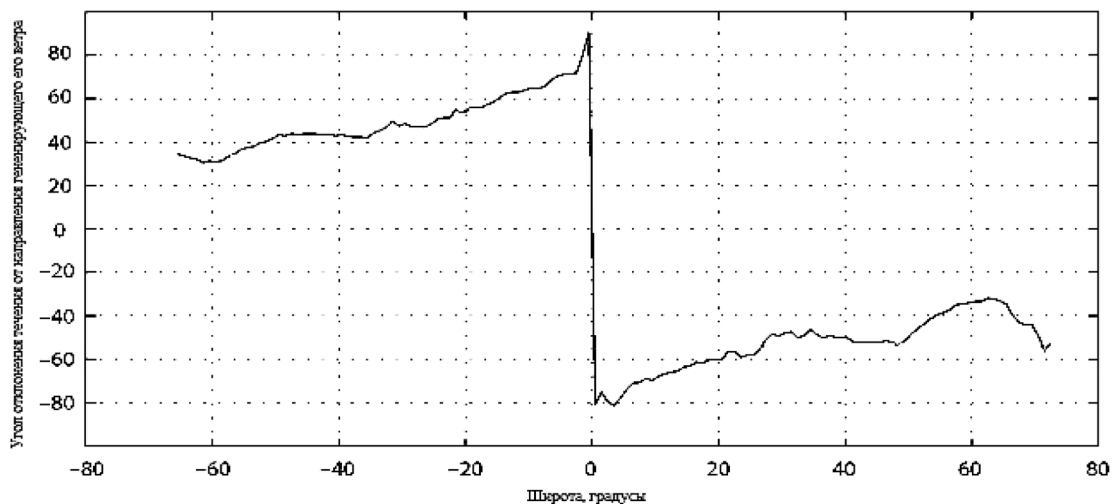


Рис. 1. Угол отклонения направления течения от направления ветра в зависимости от широты (γ)

Волновое течение. Ветер генерирует не только ветровое течение, но и волны. Одной из составляющих волнения является волновой перенос массы воды, обусловленный тем, что траектории движения частиц воды являются незамкнутыми окружностями с радиусом, уменьшающимся с глубиной по экспоненциальному закону. В результате часть воды действительно движется вперед в направлении распространения волны. Это движение получило название *волновое течение*. Волновые течения хорошо коррелируются с высотой ветровых волн. Благодаря турбулентной природе ветра и действию внутреннего трения воды, течения со временем углубляются, достигая предельной глубины, зависящей от вертикальной устойчивости вод и силы ветра. Эти течения вообще не рассматриваются ни в одном навигационном пособии.

Для расчёта скорости волнового течения можно применять формулу [16]:

$$V_{\text{волн.теч}} = \left(\frac{h}{2}\right)^2 \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi Z}{\lambda}\right), \quad (15)$$

где h — высота волны; λ — длина волны; g — ускорение силы тяжести; Z — горизонт от поверхности моря, на котором определяется скорость течения.

На основе данных наблюдений за связью между высотой волны и скоростью волнового течения была составлена эмпирическая формула

$$V_{\text{волн.теч}} = 0,115h^{0,656}, \quad (16)$$

которая является более удобной при штурманском учёте волнового течения, так как исключает параметр длины волны, который не всегда может быть достоверно получен в условиях судна.

Объединив формулы (14) – (16) и рис. 1, получим результирующие формулы для расчёта скорости и направления течений, генерируемых ветром:

$$V_{\text{вет.теч.}} = \sqrt{V_{\text{волн.теч.}}^2 + V_0^2 + 2V_{\text{волн.теч.}} V_0 \cos \gamma}; \quad (17)$$

$$\theta_{\text{вет.теч.}} = \sin^{-1} \frac{V_0 \sin \gamma}{V_{\text{вол.теч.}}} \quad (18)$$

В качестве иллюстрации влияния суммарного ветрового течения на судно, в табл. 1 и 2 приведены скорость и отклонение вектора течения от направления ветра для судна с осадкой 8 м при следовании им по рекомендованному пути перехода Гибралтар – о. Анегада (Антильские острова) [1].

Таблица 1

Скорость суммарного ветрового течения, уз

Широта	Скорость ветра, м/с			
	10	15	20	25
25	0,23	0,42	0,80	1,33
30	0,22	0,39	0,78	1,32
35	0,20	0,37	0,75	1,28

Таблица 2

Угол отклонения суммарного течения от направления ветра, град.

Широта	Скорость ветра, м/с			
	10	15	20	25
25	54	55	43	36
30	44	45	34	29
35	41	42	31	26

Таблица 3

Ошибка неучтенного ветрового течения при переходе Гибралтар – о. Анегада, ч

Ошибка неучтенного суммарного ветрового течения, ч	Скорость ветра, м/с			
	10	15	20	25
	3,0	5,4	10,5	17,0

В табл. 3 приведены значения ошибок в расчёте времени перехода для рекомендованного пути Гибралтар – о. Анегада, длина которого составляет 3174 морских миль. При средней скорости перехода в 15 уз ошибка неучтенного суммарного ветрового течения будет иметь значение от 3 ч и более при средней скорости ветра 10 м/с.

Вывод

На основе современных исследований влияния ветра на поверхность океана, таких как образование экмановского течения, генерация волн и волнового течения, можно сделать вывод о том, что на судно или другой объект, находящийся на поверхности или в толще океана, будет оказывать влияние суммарное ветровое течение, которое складывается из векторной суммы волнового и экмановского течений. Для расчёта навигационных характеристик суммарного течения генерируемого ветром можно применять формулы (17) и (18). Расчёт скорости и направления суммарного ветрового течения по этим формулам не представляет сложности и может проводиться штурманом при ведении навигации в открытом море. Также данные формулы могут применяться в специализированном программном обеспечении, направленном на определение положения буксируемого забортного оборудования в зависимости от внешних факторов.

Список литературы

1. Atlas of pilot chart North Atlantic Ocean// National Imagery and Mapping Agency US. — 2002. — NVPUB. 106. — P. 38.
2. *Cornell. J.* Ocean Atlas Pilot Chart for all Ocean of the World / J. Cornell, I.Cornell. — Midpoint Trade Books Incorporated, 2011. — P. 120.
3. Океанские пути мира. — Л.: ГУНИО, 1980. — 200 с.
4. Руководство по расчёту наивыгоднейших путей плавания судов на морях и океанах. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 160 с.
5. *Лукьянов П. В.* Динамика компактного вихря шельфовой зоны под воздействием неоднородного нестационарного ветра в районе северо-восточного побережья Чёрного моря / П. В. Лукьянов // Экологический вестник научных центров черноморского экономического сотрудничества. — 2013. — № 4. — С. 90–97.
6. *Чикин А. Л.* Расчет ветровых течений в Керченском проливе с помощью двухслойной математической модели/ А. Л. Чикин, П. А. Бирюков // Известия высших учебных заведений. — 2010. — № 5. — С. 12–16.
7. *Polton J. A.* Can Drake Passage Observations Match Ekman's Classic Theory? / J. A. Polton // Journal of Physical Oceanography. — 2013. — Т. 43. — № 8. — P. 1733–1740.
8. *Lenn Y. D.* Observationsof Ekman currents in the Southern Ocean / Y. D. Lenn, T. K. Chereskin // Journal of Physica lOceanography. — 2009. — Т. 39. — № 3. — P. 768–779.
9. *Щевьев В. А.* Ветровые течения во внутренних морях и озерах [Электронный ресурс]/ В. А. Щевьев// Электронный журнал «Исследовано в России». — Режим доступа: <http://www.sci-journal.ru/articles/2008/005.pdf> 25.03.2015 (дата обращения — 25.05.2015).
10. *Ekman V. W.* On the Influence of the Earths Rotation on Ocean Currents / V. W. Ekman // Arkiv for matematic, Asrtonomi, och Fysic. — 1905. — Вып. 2 (11). — С. 1–52.
11. *Давидан И. Н.* Сравнительная характеристика современных математических моделей ветрового волнения и их применение для решения прикладных задач / И. Н. Давидан, Г. И. Давидан // Тр. Государств. океанограф. ин-та / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Исследования океанов и морей. — 2005. — № 209. — С. 107–128.
12. Море. Развитие идей и наблюдений, связанных с изучением моря / отв. ред. В. Тиманов; пер. с англ. Б. Каган [и др.]. — Л.: Гидрометеиздат, 1965. — 464 с.
13. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / под ред. Е. С. Нестерова. — М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ), 2013. — 295 с.
14. *Stewart R.* Introduction to Physical Oceanography / R. Stewart. — Texas: Department of Oceanography Texas A&M University, 2008. — P. 353.
15. *Ralph E. A.* Wind-driven currents in the tropical / E. A. Ralph, P. P. Niiler // Journal of Physical Oceanography. — Т. 29 (9). — 1999. — P. 2121–2129.
16. *Абузаров З. К.* Оперативное океанографическое обслуживание / З. К. Абузаров, И. О. Думанская, Е. С. Нестеров. — М.: Обнинск: «ИГ–СОЦИН», 2009. — 288 с.

В. В. Лупачев,
д-р мед. наук, проф.;

Р. В. Кубасов,
канд. биол. наук, доц.;

Р. Б. Богданов,
канд. биол. наук

**ВЛИЯНИЕ КЛИМАТОГЕОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
НА СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ МОРЯКОВ ВО ВРЕМЯ РЕЙСА
(НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПУБЛИКАЦИЙ)**

**CLIMATE-GEOGRAPHIC ENVIRONMENT EFFECT TO SAILOR STAFF
HEALTH DURING SEA VOYAGE (PUBLICATIONS ANALYSIS - BASED)**

Статья посвящена анализу актуальной задачи медико-биологических исследований – изучению вопросов состояния здоровья моряков, осуществляющих профессиональную деятельность в тяжелых условиях рейсов. На основе имеющихся публикаций на эту тему выполнен обзор литературы, посвященной исследованию специфических особенностей морского труда, обусловленных влиянием климатогеографических факторов. Показано, что на состояние здоровья моряков, находящихся в рейсе, и, соответственно, на их трудоспособность оказывают влияние многочисленные факторы, среди которых природные занимают значительную часть, в наибольшей степени такие из них, как температура, физико-химические свойства воздуха и фотопериодические колебания. Отмечается, что природная обстановка морей обуславливает высокие требования к гомеостатическим системам организма моряков и может вызвать развитие преморбидных и патологических состояний. Изучение влияния этих факторов является важнейшей задачей при решении вопросов обеспечения сохранения здоровья и трудоспособности плавсостава. Мероприятия по обеспечению сохранности и укреплению здоровья моряков должны осуществляться по следующим основным направлениям: прогнозирование и предупреждение нарушений состояния здоровья, донозологическая диагностика и своевременное медицинское обеспечение, реабилитационные мероприятия в послерейсовый период.

An article covers analyses of actual problems in medico-biological investigations – it's studying of seamen health issue that has professional activity in hard voyage conditions. On basis of current publications about this topic a review that dedicated by sea work specific factors agreed different climate geographic factors was made. It has shown a sailor health and work ability accordingly undergoes from different climate geographic factors and a major impact from this one is temperature, air physical and chemical properties and contrast photoperiodic changes. It's observed that natural sea environments caused a high demand to homeostatic human system and can effect a development of premorbid and pathologic conditions. A studying of this factor effects to organism is actual medical and social problem for tasks solution in health and work ability saving of sailors. The measures for health maintenance and stabilization of sailors are provided by different ways: prognosis and prevention of health condition, prenosological diagnostics and medical aid on timely basis, rehabilitant action in time after shipping voyage.

Ключевые слова: климатогеографические факторы, морской труд, судовая среда, здоровье.

Key words: climate geographic factors, sailor work, ship's surroundings, health.

ОСОБЕННОСТИ трудовой профессиональной деятельности лиц в период морских рейсов, в первую очередь, обусловлены необходимостью продолжительного нахождения на борту водного транспортного средства [1], [2]. Медико-санитарная характеристика жизни и жизнедеятельности экипажа на борту морского судна предполагает комплекс условий, интегрируемых в единое понятие, квалифицированное как «судовая среда» [3], [4]. Эти факторы, действующие на организм персонала в течение всего периода пребывания людей в процессе рейса в условиях ограниченного объекта (судна), могут вызывать изменения в состоянии их здоровья [5] – [7]. Факторы, оказывающие влияние на состояние здоровья моряков, могут достигать не-

скольких десятков [8] – [10]. Одним из наиболее специфичных из них является изменение климатогеографических условий во время рейсов в различные точки.

Традиционным для судов Северного морского пароходства (СМП) г. Архангельска, является транспортировка различных необходимых материалов в порты районов Крайнего Севера и вывоз для экспортирования пиломатериалов и других грузов из портов Игарки и Архангельска. В течение последних 10 лет число транспортных судов СМП сократилось более чем в два раза, резко снизился объем перевозок пиломатериалов, целлюлозы и картона, постоянно сокращается объем завозимых грузов в арктические порты. Однако СМП продолжает занимать ведущее место среди пароходств страны по объему перевозок в Заполярье. Сохранились рейсы в порты Западной Европы и Средиземного моря. Исходя из важности экономического освоения арктических территорий Севера, усиления влияния морского судоходства на темпы и характер развития мировой экономики, роль старейшего в стране пароходства в г. Архангельске в экономической жизни северного региона и России в целом должна неизбежно возрасти. В настоящее время принято решение о развитии и модернизации Архангельского порта.

Суда Архангельской базы тралового флота ведут рыбопромысловые работы в Баренцевом и Норвежском море, в районе Фарерских островов. Также осуществляется переработка рыбы в портах Великобритании и Исландии. В последние годы российские моряки трудятся в условиях бербоут-чартера в Мавританской и Марокканской экономической зонах, возобновился промысел в районе Уол-фиш-Бея (Намибия).

Несмотря на то, что климат района промысла рыболовных судов Архангельской базы тралового флота может резко отличаться от региона Северного морского бассейна, наиболее «привычными» для рыбаков-северян остаются условия северных морей. Совокупность суровых высокоширотных климатогеографических факторов оказывают влияние на здоровье плавсостава моряков северного бассейна.

Бригады добычи на рыбопромысловых судах, в силу производственных обстоятельств, круглогодично и независимо от погодных условий продолжают работать на открытом воздухе [11], [12]. В этой связи считается, что холодовой фактор имеет одно из определяющих значений в формировании самочувствия и трудоспособности плавсостава [13], [14]. Зачастую низкая температура воздуха сочетается с высокой его относительной влажностью. Кроме того, наблюдаются значительные колебания парциальной плотности кислорода в воздухе в течение дня. Наконец, окружающая среда в этих районах подвергается воздействию интенсивных естественных электромагнитных полей [15], [16].

По мере продвижения к северу увеличивается влияние фактора контрастности фотопериодических изменений. В Заполярных районах зимой, с декабря по январь, наступает время полярной ночи, его относят к периоду так называемой «*биологической тьмы*», ввиду практически абсолютного отсутствия солнечного ультрафиолетового облучения. В то же время, периоды, предшествующие и последующие полярной ночи (ноябрь и февраль), квалифицируются как *биологические сумерки*. Таким образом, ультрафиолетовый дефицит на этой территории может сохраняться до 4–5 месяцев [17] – [21].

Следует отметить, что климат Крайнего Севера имеет и другие характерные особенности. Одной из наиболее существенных из них считается частая и довольно резкая смена воздушных масс. Циклоны, часто проходящие по этим территориям, сопровождаются сильными ветрами. По данным наблюдений в течение года наблюдаются сильные ветры со скоростью более 15 м/с в течение от 106 до 112 дней. Арктические циклоны и антициклоны совместно с резкими изменениями атмосферного давления со значительной амплитудой колебаний способствуют появлению областей низкого давления, неблагоприятно воздействующих на человека [22].

Во время продолжительных арктических рейсов в первые три месяца адаптационные механизмы, включающиеся в организме для обеспечения неизменности внутренней среды (гомеостаза), прежде всего, направлены на постоянство кислородной насыщенности крови. Исследования показали, что у моряков через три месяца рейса в арктических широтах наблюдаются гипоксиче-

ские явления [23], [24]. В этот период возможно возникновение дезадаптивных расстройств с нарушением состояния здоровья [25]. Также у плавсостава наблюдаются невротические реакции [26].

Во время арктической навигации зачастую у членов экипажа морского судна фиксируется напряжение вегетативного тонуса, повышается возбудимость в психоэмоциональной сфере, увеличивается количество чрезмерных метеопатических реакций на климатические условия Заполярья [27], [28]. Лабильность сосудистой системы в таких рейсах, выражающаяся в учащении пульса и повышении артериального давления, особенно выражена у лиц молодого возраста с небольшим производственным стажем работы в Заполярье [29], [30]. Такие изменения реактивности могут спровоцировать возникновение или обострение ряда соматических заболеваний, связанных с дыхательной, пищеварительной и нервной системой, а также обменом веществ [31] – [33]. Резкое снижение двигательной активности, в сочетании с воздействием внешних климатических факторов у моряков, приводит к развитию иммунобиологических и эндокринных нарушений [34] – [38]. При работе в условиях Севера низкая температура воздуха в сочетании с повышенной влажностью может привести к нарушениям функций опорно-двигательного аппарата, значительно снижающим работоспособность [39], [40].

В период арктических рейсов экипажам судов СМП периодически приходится участвовать в погрузочно-разгрузочных работах. Условия труда при этом оказывают определенное влияние на выносливость и работоспособность организма человека [41], [42]. Тяжелая физическая нагрузка на открытом воздухе в условиях низкой температуры вызывает скованность и неточность движений, что нередко приводит к травматизму моряков [43]. Этому способствует также недостаточная искусственная освещенность рабочих мест в зимний период [44], [45], о чем свидетельствуют учащение частоты сердечных сокращений, частоты дыхания, снижение мышечной силы и выносливости, неспецифической резистентности организма, изменение времени сенсомоторных реакций [46].

Исходя из ранее изложенного, можно сделать вывод о том, что суровые климатогеографические условия нахождения в северных морях в сочетании с выполнением сложных профессиональных обязанностей предъявляют повышенные требования к функциональным системам организма персонала морского транспортного средства и могут вызвать развитие как преморбидных, так и патологических проявлений.

Если изучению функций и работоспособности моряков на трассе арктических морей посвящено значительное количество работ, то вопросам оценки здоровья моряков-северян в тропических рейсах посвящены лишь единичные сообщения. Между тем, в период проживания в суровых северных климатических условиях формируется специфический региональный уровень жизнеобеспечения, который может оказаться неэффективным для пребывания и осуществления активной трудовой деятельности в южных широтах [47]. Таким образом, изучение показателей функций организма плавсостава из числа жителей севера в контрастных, противоположных месту постоянного проживания регионах, является серьезной медико-биологической проблемой.

Следует отметить, что при осуществлении морских рейсов в тропические широты на организм моряка также оказывают воздействие специфические природные условия. В этих районах климат жаркий и влажный. Кроме того, несомненным неблагоприятным фактором здесь является интенсивная инсоляция, воздействию которой в значительной степени подвержена палубная команда. В процессе адаптации к жаркому климату у людей наблюдается повышение температуры тела, учащение пульса и дыхания, снижение артериального давления (как систолического, так и диастолического). Со стороны желудочно-кишечного тракта отмечается угнетение секреторной и моторной функции. Исследованиями доказано наличие изменения у моряков водно-солевого, витаминного, углеводного и белкового обмена [48]. Причем при плавании в низких широтах неблагоприятные сбои функций организма зачастую бывают выражены в большей степени, чем во время рейсов в северные моря [49], [50].

Анализ имеющихся публикаций на эту тему показал, что внешние причины природного происхождения и климатические факторы оказывают несомненное влияние на состояние здоровья моряков и, соответственно, на их трудоспособность во время рейсов в различные регионы

планеты. Природная обстановка морей характеризуется комплексом суровых климатогеографических условий, которые предъявляют высокие требования к системам организма моряков, обеспечивающим адаптивные реакции. Продолжительное влияние и значительная степень воздействия факторов морской среды вызывают функциональные отклонения, которые могут развиваться в преморбидные и патологические состояния. Изучение влияния этих факторов является актуальной задачей при решении вопросов обеспечения сохранения здоровья и трудоспособности плавсостава.

С целью снижения развития отклонений в состоянии здоровья лиц, работающих в условиях воздействий экстремальных профессиональных факторов (в частности, моряков), для увеличения сопротивляемости и жизнестойкости организма, а также предупреждения возникновения патологических состояний, необходима разработка специальных медико-социальных мероприятий. К подобного рода мерам следует отнести:

- индивидуальный подход к выбору плавсостава для проведения различных видов работ;
- раннее диагностирование преморбидных состояний, с возможным применением лабораторных методов у лиц, работающих в экстремальных условиях);
- после рейса, связанного с работой в экстремальных условиях, проведение системных мероприятий медико-реабилитационного назначения с целью восстановления ослабленных функций организма.

Список литературы

1. *Архиповский В. Л.* Организационные аспекты работы отделения медицинской профилактики по улучшению здоровья работников водного транспорта / В. Л. Архиповский, Е. В. Казакевич // *Экология человека*. — 2007. — № 12. — С. 48–52.
2. *Криворотько А. С.* Психологические особенности переживания одиночества моряками дальнего плавания / А. С. Криворотько // *Психопедагогика в правоохранительных органах*. — 2013. — № 3 (54). — С. 71–75.
3. *Зайцев В. И.* Некоторые теоретические и практические аспекты изучения условий труда на флоте / В. И. Зайцев, С. А. Виноградов // *Здоровье населения и среда обитания*. — 2014. — № 2 (251). — С. 13–15.
4. *Галанкин Л. Н.* Инновационное развитие медицинского обеспечения на морском судне / Л. Н. Галанкин, В. В. Буров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 2 (24). — С. 9–16.
5. *Кузнецов М. С.* Экологическая безопасность на судне – основа жизни моряка / М. С. Кузнецов, И. С. Малышев, И. Л. Афонин // *Водный транспорт*. — 2012. — № 1 (13). — С. 68–71.
6. *Панов Б. В.* Состояние здоровья моряков по результатам предварительных и периодических медицинских осмотров. Сообщение второе: показатели заболеваемости моряков возрастных и стажевых групп / Б. В. Панов, С. В. Балабан, С. Г. Чебан [и др.] // *Актуальные проблемы транспортной медицины*. — 2013. — № 4 (34). — С. 47–56.
7. *Рымина Т. Н.* Особенности воздействия стресса на работников плавсостава в условиях работы на море / Т. Н. Рымина, Е. В. Пятурова // *Здоровье. Медицинская экология. Наука*. — 2014. — № 4 (58). — С. 103–105.
8. *Асмолов А. К.* Вторичный иммунодефицит: следствие или причина бронхо-легочных заболеваний? / А. К. Асмолов // *Туберкулез, легочные болезни, ВИЧ-инфекция*. — 2012. — № 4 (11). — С. 35–41.
9. *Ломов О. П.* Физические факторы обитаемости кораблей и судов / О. П. Ломов, И. М. Ахметзянов, М. О. Соколов [и др.]. — СПб., 2014. — 560 с.
10. *Никитин А. М.* Установление приоритетов при управлении техническим обслуживанием судовых технических средств / А. М. Никитин // *Сб. науч. тр. профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — СПб., 2014. — С. 130–132.

11. Вагин В. А. Динамика качества жизни моряков Сахалинской области, связанного со здоровьем / В. А. Вагин // Медицина экстремальных ситуаций. — 2012. — № 2 (40). — С. 23–27.
12. Камалутдинов С. Р. Признаки хронической сердечной недостаточности у моряков торгового флота во время длительных рейсов / С. Р. Камалутдинов, В. В. Попов, Т. Н. Иванова // Авиакосмическая и экологическая медицина. — 2012. — Т. 46. — № 3. — С. 64–67.
13. Агаджанян Н. А. Адаптация человека к среде обитания и трудовой деятельности / Н. А. Агаджанян // Бюллетень АМН СССР. — 1982. — № 6. — С. 92–97.
14. Башир-Заде Т. С. Использование многоуровневой оценки и прогнозирования состояния (СМ ОП) для определения устойчивости организма человека к низкотемпературному воздействию водной среды / Т. С. Башир-Заде // Морской медицинский журнал. — 1997. — № 1. — С. 18–20.
15. Неверова Н. П. Активность электромагнитного поля Земли и здоровье человека в условиях Европейского Севера / Н. П. Неверова // Экология человека. — 1998. — № 3. — С. 21–24.
16. Поскотинова Л. В. Варианты динамики спектральных показателей электроэнцефалограммы человека в ходе суточных вариаций геомагнитного поля / Л. В. Поскотинова, Д. Б. Дёмин, Е. В. Кривоногова // Экология человека. — 2014. — № 5. — С. 3–8.
17. Кривошеков С. Г. Системные механизмы адаптации и компенсации / С. Г. Кривошеков, В. П. Леутин, В. Э. Диверт // Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. — 2004. — № 2. — С. 148–153.
18. Панин Л. Е. Гомеостаз и проблемы приполярной медицины (методологические аспекты адаптации) / Л. Е. Панин // Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. — 2010. — № 3. — С. 6–11.
19. Хаснулин В. И. Современные представления о механизмах формирования северного стресса у человека в высоких широтах / В. И. Хаснулин, П. В. Хаснулин // Экология человека. — 2012. — № 1. — С. 3–11.
20. Физиологические закономерности гормональных, метаболических, иммунологических изменений в организме человека на Европейском Севере // Труды Коми научного центра УрО РАН / под ред. Ю. Г. Солонина. — Сыктывкар: УрО РАН, 1997. — Вып. № 152. — 160 с.
21. Эндокринная система и обмен веществ у человека на Севере / под ред. А. В. Ткачева. — Сыктывкар: Коми науч. центр УрО РАН, 1992. — 156 с.
22. Решняк В. И. Профессиональная деятельность работников флота в условиях хронофизиологической адаптации / В. И. Решняк, А. Г. Щуров, О. В. Витязева // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 20–24.
23. Гудков А. Б. Адаптивные реакции организма моряков рыбопромыслового флота / А. Б. Гудков, Ф. А. Щербина, И. Л. Мызников; Минздравсоцразвития РФ, Северный научный центр Северо-западного отд. РАМН. — Архангельск: Северный госуниверситет, 2011.
24. Ишеков А. Н. Показатели стабилотрии в динамике арктического рейса / А. Н. Ишеков, И. Г. Мосегин // Мир науки, культуры, образования. — 2013. — № 4 (41). — С. 355–358.
25. Щербина Ф. А. Адаптивные реакции организма моряков рыбопромыслового флота в динамике 75-суточного рейса / Ф. А. Щербина // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Медико-биологические науки. — 2014. — № 3. — С. 91–99.
26. Транковский Д. Е. Условия труда и профессиональная заболеваемость работников транспорта в Приморском крае / Д. Е. Транковский // Здоровье. Медицинская экология. Наука. — 2013. — № 4 (58). — С. 111–113.
27. Жеглов В. В. Повышение устойчивости моряков к заболеваниям / В. В. Жеглов, Ф. М. Семёнов, В. И. Касаткин // Морской сборник. — 2012. — № 7 (1984). — С. 47–51.
28. Стрелкова О. В. Психологические аспекты профессиональной деятельности моряков / О. В. Стрелкова // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. — 2010. — № 5. — С. 45–51.
29. Иванов В. И. Профилактика заболевания сердечно-сосудистой системы в практике корабельного врача / В. И. Иванов // Морской сборник. — 2013. — № 6 (1995). — С. 65–68.
30. Псядло Э. М. Взаимосвязь функционального состояния сердечнососудистой системы и психофизиологического статуса моряков / Э. М. Псядло // Актуальные проблемы транспортной медицины. — 2014. — № 1 (35). — С. 61–68.
31. Андреева Е. А. Функциональное состояние респираторной системы у больных пневмониями моряков Северного бассейна / Е. А. Андреева, Е. А. Соснина // Функциональная диагностика. — 2010. — № 3. — С. 67.

32. Петрова Т. Б. Изменение параметров углеводного обмена у плавсостава Северного водного бассейна / Т. Б. Петрова, Я. И. Бичкаев, Ф. А. Бичкаева [и др.] // Экология человека. — 2009. — № 8. — С. 12–18.
33. Симоненко В. Б. О структуре заболеваемости патологией органов пищеварения у моряков / В. Б. Симоненко, А. С. Александров, П. А. Дулин [и др.] // Военно-медицинский журнал. — 2008. — № 4 (329). — С. 58.
34. Добродеева Л. К. Иммунологические характеристики у работающих на архипелаге Шпицберген / Л. К. Добродеева, А. В. Ткачев, Е. В. Типисова, С. Л. Кашутин // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. — 1998. — № 1–2 (84). — С. 119–124.
35. Леванюк А. И. Состояние иммунной системы у моряков / А. И. Леванюк // Экология человека. — 2010. — № 5. — С. 20–23.
36. Лупачев В. В. Изменения общих сывороточных иммуноглобулинов и показателей сердечнососудистой системы у моряков в динамике арктического рейса / В. В. Лупачев, М. Ю. Юрьева, Р. В. Кубасов // Мир науки, культуры, образования. — 2013. — № 3(40). — С. 383–385.
37. Лупачев В. В. Эндокринные сдвиги у моряков во время длительного рейса в Заполярье / В. В. Лупачев, Ю. Ю. Юрьев, Р. В. Кубасов // Медицинское обеспечение сил флота в условиях Кольского Заполярья: материалы научно-практической конференции, посвященной 75-летию образования 1469-го Военно-морского клинического госпиталя Северного флота. — 2011. — С. 160–161.
38. Щёголева Л. С. Соотношение иммуно-гормональных реакций у лиц разных профессий в приполярном районе / Л. С. Щёголева, М. В. Меньшикова, Е. Ю. Шашкова // Экология человека. — 2009. — № 7. — С. 7–10.
39. Мозер А. А. Динамика заболеваемости и утраты трудоспособности у плавсостава Северного бассейна / А. А. Мозер, В. Д. Болотов, А. А. Коробицын // Экология человека. — 2000. — № 3. — С. 44–48.
40. Поляков И. В. Здоровье и проблемы организации медицинского обеспечения моряков дальнего плавания в современных условиях / И. В. Поляков, И. В. Колесников, В. В. Буров. — СПб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2004.
41. Жильцова И. И. О поддержании работоспособности моряков в походе надводного корабля в условиях Заполярья / И. И. Жильцова, А. М. Ярков, А. А. Мясников // Военно-медицинский журнал. — 2012. — № 9 (333). — С. 62–67.
42. Хугаева С. Г. Динамика показателей вегетативной регуляции сердечного ритма у рыбаков тралового флота на промысле в условиях арктического рейса / С. Г. Хугаева, И. М. Бойко, С. В. Марунок [и др.] // Экология человека. — 2012. — № 1. — С. 29–32.
43. Мызников И. Л. Состояние здоровья, заболеваемость и травматизм плавсостава Северного флота / И. Л. Мызников, А. В. Милошевский, Н. В. Аскерко [и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина. — 2013. — № 2 (47). — С. 13–20.
44. Мацевич Л. М. Факторы, формирующие среду обитания при эксплуатации объектов водного транспорта / Л. М. Мацевич, А. М. Вишневский, А. Б. Разлетова [и др.] // Казанский медицинский журнал. — 2009. — Т. 90. — № 4. — С. 597–600.
45. Мельникова И. П. Влияние производственных факторов на здоровье моряков / И. П. Мельникова // Гигиена и санитария. — 2007. — № 1. — С. 42–44.
46. Ильяева Е. Н. Медико-социальные аспекты потери слуха в трудоспособном возрасте / Е. Н. Ильяева // Медицина труда и промышленная экология. — 2009. — № 12. — С. 32–38.
47. Бердышев В. В. Некоторые закономерности адаптации человека к условиям влажных тропиков / В. В. Бердышев // Адаптация человека в различных климатогеографических и производственных условиях: тезисы докладов Всесоюзной конференции. — Т. 1. — Новосибирск, 1981. — С. 17–19.
48. Бойко Е. П. Гемодинамические сдвиги у моряков при плавании в тропических широтах / Е. П. Бойко // Кардиология. — 1973. — № 5. — С. 140–141.
49. Сапов И. А. Некоторые физиологические и медицинские аспекты адаптации / И. А. Сапов // Морской медицинский журнал. — 1998. — № 6. — С. 24–29.
50. Суханов С. Г. Адаптация моряков к условиям рейсов / С. Г. Суханов, П. И. Сидоров, К. К. Рогаев // Руководство по морской медицине; под ред. П. И. Сидорова. — Архангельск: Изд-во АГМА, 1998. — С. 25–60.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ОКЕАНЕ

THE ABSORPTION INTENSITY OF THE ACOUSTIC WAVES IN THE OCEAN

В статье исследуется влияние пузырьков газа на поглощение звуковой волны в жидкости. В отличие от ранее опубликованных работ, используется модель баротропной пузырьковой жидкости с учетом капиллярного эффекта. Описываются основные закономерности распространения и затухания звука в морской воде. Дается физическая интерпретация этих закономерностей. В работе исследуются два типа решения: первое – синусоидальное по координате и затухающее экспоненциально во времени возмущение, второе – синусоидальное по времени колебание, затухающее экспоненциально по длине возмущения, являющееся волновым аналогом вынужденных колебаний. Показано, что коэффициент поглощения, согласно классической теории затухания, возрастает с увеличением вязкости жидкой фазы. Результаты численных расчетов показали, что затухание звука в газожидкостной среде усугубляется тем, что поглощение наиболее сильно происходит именно на резонансной частоте.

In this article we investigate the influence of gas bubbles on the absorption of sound wave in the liquid. In contrast to published studies using barotropic model bubbly liquid with the capillary effects. Describes the basic laws of propagation and damping of sound in seawater. Physical interpretation of these laws are given. We study two types of solutions. The first decision – sinusoidal coordinate and decay exponentially in time perturbation. A second solution – sinusoidal oscillation time, decaying exponentially with the length of the disturbance is a wave analogue of forced oscillations. It is shown that the absorption coefficient according to the classical theory of damping increases with the viscosity of the liquid phase. The numerical results showed that the damping of sound in the gas-liquid medium is compounded by the fact that the absorption occurs is most strongly at the resonance frequency.

Ключевые слова: газ, пузырек, частота, звуковая волна, колебание, поглощение звука, плотность, поле давления, затухание колебаний, объемная концентрация.

Key words: gas, bubble, frequency, sound wave, oscillation, sound absorption, density, pressure field, fluctuation damping, volume concentration.

Введение

Изучение Мирового океана с каждым годом становится все более актуальной задачей как в научном, так и в техническом отношении. Каждый год возникают все новые проблемы и становится ясным, что многие, казалось бы, давно изученные вопросы, оказываются значительно более сложными, чем предполагалось, и все они еще далеки от своего решения [1] – [3].

В настоящее время широко используются дистанционные методы экспериментального исследования Мирового океана с помощью радиоволн. Последние практически совсем не проникают в морскую воду вследствие ее электропроводности и затухают на расстоянии, много меньшем длины волны. Освещенность видимой части светового спектра падает в морской воде в тысячи раз на протяжении десятков или, в лучшем случае, одной-двух сотен метров и лишь звуковые волны могут распространяться в водной среде на сотни километров. Это несомненное преимущество акустических волн над другими видами излучения определило их широкое использование в приборах, предназначенных для работы в водах морей и океанов.

Распространение акустических колебаний в море также сопровождается уменьшением их интенсивности. Причины затухания звуковых волн в море не исчерпываются лишь вязкостью, теплопроводностью, релаксационными (молекулярными) процессами, т. е. поглощением. В такой неоднородной среде, как морская вода, важной причиной затухания является рассеяние волны

неоднородностями, рассредоточенными в толще воды. Особая роль здесь принадлежит таким рассеивателям, как газовые пузырьки.

Рассеяние звуковой волны неоднородностями среды зависит от формы и размеров неоднородностей, от сжимаемости и плотности их вещества, и, соответственно, от волнового сопротивления. Если сжимаемость и плотность такие же, как у среды, то неоднородности не вызывают рассеяния, независимо от их размеров и формы. В противном случае, рассеяние, в той или иной мере, будет наблюдаться [4].

Газовый пузырек – это неоднородность, отличающаяся от воды как плотностью, так и сжимаемостью. Плотность жидких тел очень мало изменяется при изменении давления – внутренние силы стойко сопротивляются внешнему воздействию, стремящемуся уменьшить или увеличить объем, занимаемый данной массой вещества. Это сопротивление столь велико, что для решения многих задач жидкости можно считать несжимаемыми. Однако даже минимальные изменения плотности твердых и жидких сред, происходящие при изменении давления, в акустике играют первостепенную роль и ими нельзя пренебрегать.

Основная часть

Исследуем влияние пузырьков газа на поглощение звуковой волны в жидкости. При этом, в отличие от опубликованных работ, допустим, что состояния пузырьковой жидкости с учетом капиллярных эффектов описывается уравнением, предложенным в работах [5] и [6]. Запишем уравнения неразрывности, одномерного движения и состояния жидкости в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\alpha_{20}(1+S)\rho/\rho_0}{1 - \alpha_{10}\rho/\rho_0} - S \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{20}\rho/\rho_0}{1 - \alpha_{10}\rho/\rho_0}}; \quad S = \frac{2\sigma}{R_0 p_0}. \quad (3)$$

Волны можно рассматривать как возмущения малой амплитуды, учет которых позволяет проводить линеаризацию уравнений (1) – (3):

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\bar{p}}{\bar{\rho}} = C_0^2, \quad C_0 = \sqrt{\frac{p_0}{\alpha_{20}\rho_0} \cdot \frac{3+2S}{3}}, \quad (6)$$

где $\bar{\rho}$, $\bar{p}$, $\bar{u}$ – возмущения соответствующих характеристик акустической волной.

Из уравнений (4) и (6) следует

$$\frac{1}{C_0^2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Если это уравнение продифференцировать по t , а уравнение (5) – по x , то удастся исключить возмущение скорости и получить волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial t^2} = C_0^2 \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial x^2}. \quad (8)$$

В водной среде акустические колебания являются продольными. Рассмотрим наиболее простой, представляющий практический интерес случай плоских гармонических продольных волн в виде действительной части комплексного выражения:

$$\bar{p} = \bar{p}^0 \exp[i(k_*x + \omega_*t)]; \quad \bar{p}^0 = \bar{p}_*^0 + i\bar{p}_{**}^0; \quad |\bar{p}^0| \ll 1; \quad k_* = k + ik_{**}; \quad \omega_* = \omega + i\omega_{**}, \quad (9)$$

где $\bar{p}^0$ – определитель амплитуды возмущений давления.

Возможны два типа решения.

Тип I. Решение или волна первого типа, когда $k_* = k$ – действительное положительное число ($k > 0, k_{**} = 0$).

В этом случае будем иметь:

$$\bar{p} = (\bar{p}_*^0 + i\bar{p}_{**}^0) \exp[i(kx + \omega t + i\omega_{**}t)] = (\bar{p}_*^0 + i\bar{p}_{**}^0) \exp(-\omega_{**}t) \times [\cos(kx + \omega t) + i \sin(kx + \omega t)];$$

$$\operatorname{Re}\{\bar{p}\} = \exp(-\omega_{**}t) |\bar{p}^0| \sin[\varphi + (kx + \omega t)].$$

$$\text{Здесь } |\bar{p}^0| = \sqrt{\bar{p}_*^{02} + \bar{p}_{**}^{02}}; \quad \varphi = \arctg(-\bar{p}_*^0 / \bar{p}_{**}^0).$$

Таким образом, решение первого типа представляет собой синусоидальное по координате и при $\omega_{**} > 0$ экспоненциально затухающее во времени возмущение, которое называют k -волной:

$$\bar{p}(k) = |\bar{p}^0| \exp[-\omega_{**}(k)t] \sin\left\{\varphi + \frac{2\pi[x + v_\phi(k)t]}{\lambda(k)}\right\},$$

где $v_\phi(k) = \omega(k)/k$; $\lambda(k) = 2\pi/k$; φ – начальная фаза.

Здесь $v_\phi(k)$ – фазовая скорость, или скорость перемещения фазы колебания; $\lambda(k)$ – длина волны; $\omega_{**}(k)$ – декремент затухания колебаний во времени.

Другими словами, k -волны – это волны с однородной по длине, но изменяющейся во времени амплитудой, являющиеся аналогом свободных колебаний.

Тип II. Решения или волны второго типа, когда $\omega_* = \omega$ – действительное положительное число, т. е. $\omega > 0$ и $\omega_{**} = 0$. В данном случае имеем:

$$\bar{p} = (\bar{p}_*^0 + i\bar{p}_{**}^0) \exp[i(kx + \omega t + ik_{**}x)] = (\bar{p}_*^0 + i\bar{p}_{**}^0) \exp(-k_{**}x) \times [\cos(kx + \omega t) + i \sin(kx + \omega t)];$$

$$\operatorname{Re}\{\bar{p}\} = \exp(-k_{**}x) |\bar{p}^0| \sin[\varphi + (kx + \omega t)].$$

Таким образом, решение второго типа представляет собой синусоидальное по времени колебание, возбуждаемое, например, каким-либо стационарным внешним источником монохроматических колебаний при $x = 0$, экспоненциально затухающей по длине амплитудой. Такие возмущения, являющиеся волновым аналогом вынужденных колебаний, называют ω -волнами:

$$\bar{p}(\omega) = |\bar{p}^0(\omega)| \exp(-k_{**}(\omega)x) \sin\left\{\varphi + \frac{2\pi[x + v_\phi(\omega)t]}{\lambda(\omega)}\right\}; \quad v_\phi(\omega) = \omega/k(\omega); \quad \lambda(\omega) = 2\pi/k(\omega).$$

Здесь $k_{**}(\omega)$ – декремент затухания колебаний по длине.

Другими словами, ω -волны – это волны со стационарными по времени, но изменяющимися по длине амплитудами. Случай $k_{**} > 0$ соответствует режиму затухания амплитуд возмущения. Ограничимся только ω -волнами ($\omega > 0, \omega_{**} = 0$).

Если воспользоваться выражением (9) в уравнении (8), то получим дисперсионное уравнение вида $\omega/k = C_0$. Поскольку поток количества движения за счет трения и других внешних сил в уравнении (2) не учитывался, то волновое число оказывается действительным положительным числом и фазовая скорость оказывается равной скорости звука: $\omega/k = C_0$, а декремент затухания равен нулю.

Рассмотрим иную постановку задачи с эффективной вязкостью μ_{ef} в уравнении радиального движения для учета всех возможных диссипативных эффектов с использованием условия политропии газа [7] – [10]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{p_2 - p - 2\sigma/R}{\rho_1^0} - \frac{4\mu_{ef}\dot{R}}{R\rho_1^0}; \quad \frac{p_2}{p_{20}} = \left(\frac{\rho_2^0}{\rho_{20}^0}\right)^k. \quad (10)$$

Уравнение импульса среды, сохранения массы фаз и индивидуального пузырька можно представить в следующем виде:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \quad \rho \approx \rho_1^0 \alpha_1; \quad \rho_1^0 = \text{const};$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u)}{\partial x} = 0; \quad \frac{d}{dt}(\rho_2^0 R^3) = 0. \quad (11)$$

Объемная концентрация газа α_{20} связана с количеством пузырьков в единице объема смеси равенством:

$$\alpha_2 = \frac{4}{3}\pi R^3 n \quad (12)$$

где $\frac{n}{n_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$.

Если выполнить линеаризацию уравнений (10) – (12), то в безразмерных переменных и параметрах запишем:

$$\bar{R} = R/R_0; \quad \bar{\rho}_2 = \rho_2/\rho_{20}^0; \quad \bar{p} = p/p_0; \quad \bar{p}_2 = p_2/p_{20}; \quad \bar{u} = u/u_0;$$

$$u_0 = R_0/t_0; \quad t_0 = R_0^2/\nu_{ef}; \quad \nu_{ef} = \mu_{ef}/\rho_{10}^0; \quad S = 2\sigma/R_0 p_0; \quad \text{Pe} = \frac{p_0}{\rho_{10}^0} \frac{R_0^2}{\nu_{ef}^2}; \quad (13)$$

$$p_{20} = p_0 + 2\sigma/R_0; \quad \tau = t/t_0; \quad X = x/R_0.$$

Получим следующую систему уравнений относительно возмущений переменных:

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau} = -\alpha_{10} \frac{\partial \bar{u}}{\partial X}; \quad \alpha_{10} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} = -\text{Pe} \frac{\partial \bar{p}}{\partial X}; \quad \alpha_2 = 3\alpha_{10}\alpha_{20}\bar{R}; \quad \bar{p}_2 = k\bar{\rho}_2^0;$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_2^0}{\partial \tau} + 3\frac{\partial \bar{R}}{\partial \tau} = 0; \quad \frac{d^2 \bar{R}}{d\tau^2} = \text{Pe} \cdot [(1+S)\bar{p}_2 - \bar{p} + S\bar{R}] - 4\frac{d\bar{R}}{d\tau}. \quad (14)$$

Исключив возмущения скорости, объемного газосодержания, давления и плотности газа, получим систему уравнений:

$$3\alpha_{10}\alpha_{20} \frac{d^2 \bar{R}}{d\tau^2} = \text{Pe} \cdot \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial X^2}; \quad \frac{d^2 \bar{R}}{d\tau^2} = \text{Pe} \cdot \left\{ \bar{R} [S - 3k(1+S)] - \bar{p} \right\} - 4\frac{d\bar{R}}{d\tau}. \quad (15)$$

Будем искать решение системы (15) в виде действительной части комплексного выражения:

$$\bar{p} = \bar{p}^0 \exp[i(K_* X + \Omega \tau)]; \quad \bar{p}^0 = \bar{p}_*^0 + i\bar{p}_{**}^0; \quad |\bar{p}^0| \ll 1; \quad k_* = k + ik_{**};$$

$$\bar{R} = \bar{R}^0 \exp[i(K_* X + \Omega \tau)]; \quad \bar{R}^0 = \bar{R}_*^0 + i\bar{R}_{**}^0; \quad |\bar{R}^0| \ll 1; \quad \Omega = \omega R_0^2/\nu_{ef}; \quad K_* = k_* R_0. \quad (16)$$

Получим систему линейных однородных алгебраических уравнений:

$$3\alpha_{10}\alpha_{20}\bar{R}^0 \cdot \Omega^2 = \text{Pe} \cdot \bar{p}^0 \cdot K_*^2; \quad \bar{R}^0 \cdot \Omega^2 = \text{Pe} \cdot \left\{ \bar{R}^0 [S - 3k(1+S)] + \bar{p}^0 \right\} + 4\bar{R}^0 i \cdot \Omega. \quad (17)$$

Из условия существования нетривиального решения системы (17) вытекает следующая дисперсионная зависимость волнового числа K от частоты Ω :

$$\frac{K_*^2}{\Omega^2} = \frac{3\alpha_{10}\alpha_{20}}{\Omega + Q - 4i}; \quad Q = [3k(1+S) - S] \cdot \text{Re}. \quad (18)$$

Решив уравнение (18) с помощью выделения действительной и мнимой части решения, найдем выражения для фазовой скорости $C_f = \overline{C}_f \cdot \frac{v_{ef}}{R_0}$ и декремента затухания колебаний по длине $k_{**} = K_{**} / R_0$ в виде:

$$\overline{C}_f = \frac{\Omega}{K} = \frac{Q_0}{\sqrt{\frac{\Omega + Q}{(\Omega + Q)^2 + 16}} + \sqrt{\frac{1}{(\Omega + Q)^2 + 16}}}; \quad Q_0 = \sqrt{\frac{2}{3\alpha_{10}\alpha_{20}}}; \quad (19)$$

$$K_{**} = \Omega Q_0 \sqrt{\frac{1}{\sqrt{(\Omega + Q)^2 + 16}} - \frac{\Omega + Q}{(\Omega + Q)^2 + 16}}. \quad (20)$$

Мнимая часть $K_{**} > 0$ положительна. Поэтому амплитуды возмущения затухают по координате.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости коэффициента поглощения $k_{**} = K_{**} / R_0$ и фазовой скорости $C_f = \overline{C}_f \cdot v_{ef} / R_0$ от частоты $\omega = \Omega v_{ef} / R_0^2$. Равновесный радиус пузырьков принимался равным 10 мкм, а объемное газосодержание – 5 %.

Анализ выражения (20) показывает, что коэффициент поглощения, согласно классической теории затухания, возрастает с увеличением коэффициента вязкости и, что очень важно, частоты.

Как видно из рис. 1, характерным является диапазон частот, который иногда называют *диапазоном непрозрачности* из-за больших значений декремента затухания k_{**} . Это означает, что в данном диапазоне волна будет сильнее поглощаться.

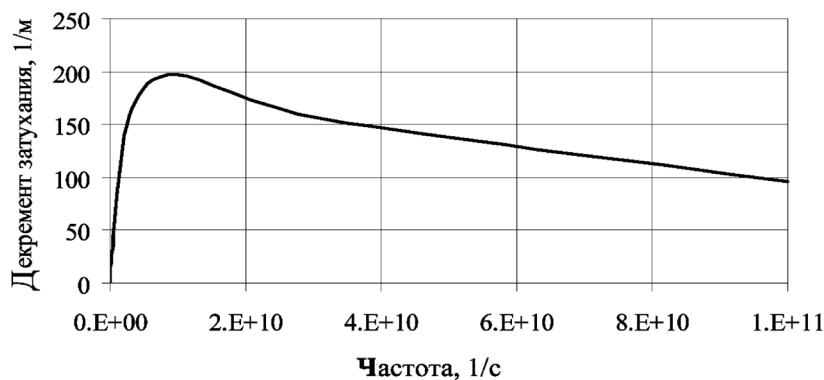


Рис. 1. Зависимость декремента затухания от частоты

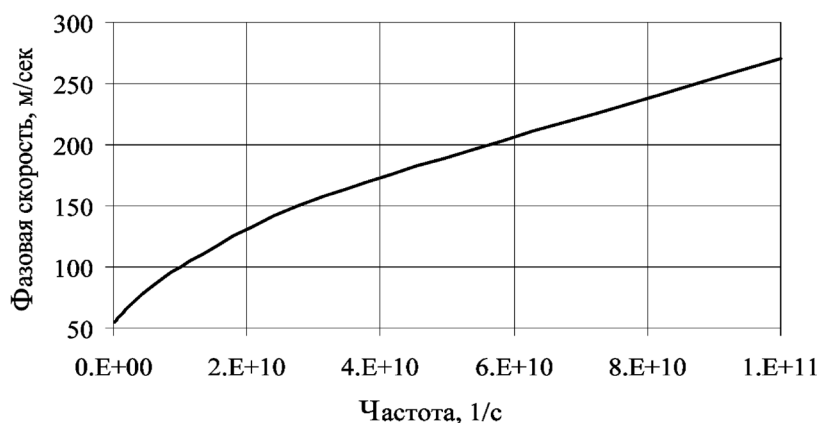


Рис. 2. Зависимость фазовой скорости от частоты

В связи с тем, что в морской воде в течение длительного периода времени могут существовать во взвешенном состоянии пузырьки с миллиметровыми диаметрами, аномальное затухание в море могут испытывать волны, имеющие частоту, равную десяткам килогерц, что подтверждается также практическими наблюдениями.

Затухание звука на газовых пузырьках усугубляется еще и тем, что они не только рассеивают, но и поглощают часть энергии звуковой волны, и это поглощение наиболее сильно происходит именно на резонансной частоте.

Выводы

Отметим, что в приведенной постановке затухание колебаний пузырьков возможно только за счет вязкой диссипации и сжимаемости газожидкостной смеси, так как при выводе уравнения состояния пузырьковой жидкости считалось, что температура смеси постоянна, тепловая диссипация и сжимаемость несущей фазы не учитывались. В этом можно убедиться из анализа аналитического решения дисперсионного уравнения, представленного в виде формул для фазовой скорости и декремента затухания колебаний. Расчеты, выполненные на основе этого уравнения состояния, при изучении характера затухания звуковых волн в море показали, что интенсивность волны значительно убывает из-за наличия газа в жидкости, а демпфирование волны существенно возрастает с увеличением объемного газосодержания.

Влияние поверхностного натяжения на характеристики звуковой волны в жидкости с размерами пузырьков более 10 мкм несущественно и им можно пренебречь.

Список литературы

1. Безруков Ю. Ф. Океанология: в 2 ч. — Ч. I. Физические явления и процессы в океане / Ю. Ф. Безруков. — Симферополь: Таврический нац. ун-т им. В. И. Вернадского, 2006. — 159 с.
2. Доронин Ю. П. Физика океана / Ю. П. Доронин. — СПб., 2010. — 274 с.
3. Голодов Н. Ф. Методы прогнозирования температуры и солености моря для определения скорости звука в воде / Н. Ф. Голодов // Судовождение: сб. науч. тр. / Одесская национальная морская академия. — Вып. 15. — Одесса: ИздатИнформ, 2008. — С. 44–52.
4. Nigmatulin R. I. Mathematical modelling of a single bubble and multibubble dynamics in a liquid / R. I. Nigmatulin, I. Sh. Akhatov // Proc. Int. Conf. on Multiphase Systems. — Ufa. — 2000. — P. 294–301.
5. Нигматулин Р. И. Динамика импульсных волн в пузырьковых жидкостях. Сравнение теории с экспериментом / Р. И. Нигматулин, Д. А. Губайдуллин, А. А. Никифоров // Доклады Академии наук. — 2014. — Т. 456. — № 6. — С. 662.
6. Губайдуллин А. А. Введение в волновую динамику газожидкостных сред: учеб. пособие / А. А. Губайдуллин. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. — 86 с.
7. Нагиев Ф. Б. Нелинейные колебания растворимых газовых пузырьков в жидкости / Ф. Б. Нагиев // Известия АН Аз. ССР. Серия: Физ.-техн. и матем. науки. — 1985. — № 1. — С. 136–140.
8. Нагиев Ф. Б. Декременты затухания колебаний растворимых газовых пузырьков, радиально пульсирующих в жидкости / Ф. Б. Нагиев // Известия АН Аз. ССР. Серия: физ.-техн. и матем. науки. — 1984. — № 4. — С. 125–130.
9. Хабеев Н. С. Динамика растворимых газовых пузырьков / Н. С. Хабеев, Ф. Б. Нагиев // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. — 1985. — № 6. — С. 52–59.
10. Nigmatulin R. Dynamics, heat-mass transfer of vapor-gas bubbles in a liquid. Printed in Great Britain / R. I. Nigmatulin, N. S. Khabeev, F. B. Nagiyev // Inter. J. Heat and Mass Transfer. — 1981. — Vol. 24. — № 6. — P. 1033–1044.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ АРОЧНОГО ТИПА

ANALYTICAL STUDY OF DEFORMATIONS OF A FLAT TRUSS ARCH TYPE

Методом индукции получены точные формулы для расчета прогиба статически определимой фермы, являющейся аналогом широко применяемой в покрытиях портовых сооружений схемы стропильной фермы «Молодечно». Предлагаемая схема фермы отличается большим подъемом, что заметно увеличивает высоту рабочего помещения. Размеры фермы определяются двумя геометрическими параметрами и числом панелей. Прогиб фермы вычисляется в предположении упругой работы ее элементов. Расчет усилий производится методом вырезания узлов. По заданным координатам узлов (идеальных шарниров) определяются направляющие косинусы усилий. Система уравнений записывается в матричной форме. Нагрузки, приложенные к узлам фермы, заносятся в вектор правой части системы. Прогиб определяется по формуле Максвелла – Мора с индукцией по числу панелей, что позволяет вывести аналитическую зависимость прогиба от числа панелей и провести соответствующий асимптотический анализ. Все преобразования и решения алгебраических и рекуррентных уравнений выполнены в системе компьютерной математики Maple.

By induction, we have obtained exact formulas for calculation of deflection of statically determinate truss, which is analogous to the widely used in the coatings of port facilities scheme rafter “Molodechno”. The proposed scheme truss features has a large lift, which significantly increases the height of the working space. The truss sizes are determined by two geometric parameters and number of panels. The deflection of the truss is calculated assuming the elastic behavior of its elements. The calculation forces is made by the method of cutting out knots. On the given coordinates of the nodes (joints) are defined by the guides of the cosines of the forces. The system of equations is written in matrix form. The loads applied to the truss nodes are added to the vector of the right part of the system. The deflection is determined by the formula of Maxwell-Mohr by induction on the number of panels. This allows to find the dependence of the deflection on the number of panels and corresponding asymptotic analysis. All transformations and solutions of algebraic and recursive equations implemented in the computer algebra system Maple.

Ключевые слова: ферма, прогиб, аналитическое решение, Maple, индукция.
Key words: farm, deflection, analytical solution, Maple, induction.

Введение

Легкие, прочные и сравнительно недорогие ферменные конструкции широко распространены в зданиях и сооружениях промышленного и гражданского назначения: в навесах, портовых складах, гидротехнических сооружениях, портовых кранах, мостах как элементы ребер жесткости и других конструкциях. Особенно часто используется балочная плоская ферма с небольшим уклоном (до 10 %) верхнего пояса с треугольной решеткой типа «Молодечно» [1] – [3]. Фермы такого типа хорошо апробированы, имеется множество таблиц усилий в стержнях фермы, полученных численно различными методами. Предлагаемая схема фермы также имеет треугольную решетку (рис. 1) и стержни раскоса одинаковой длины h (рис. 2). Вся геометрия фермы определяется размерами a и b и числом панелей в половине пролета. Длина раскоса выражается через эти параметры (рис. 2): $h = (a^2 + b^2) / (2b) = c^2 / (2b)$.

Зададимся целью получить аналитическое решение для напряженно-деформированного состояния фермы в зависимости от величины нагрузки, геометрических параметров и числа панелей. Последняя зависимость (от числа панелей) наиболее сложная. Решение задачи о прогибе фермы и усилиях в ее стержнях для конкретного, пусть даже очень большого числа панелей, пред-

ставляет стандартную задачу, выполняемую в численном или аналитическом виде в студенческих курсах по строительной механике и сопротивлению материалов. Следует отметить, что формулы для прогиба фермы в зависимости от числа панелей редки и часто не очень точны, так как обычно сводятся к аппроксимации фермы сплошным брусом, исходя из равенства эффективной жесткости [4]. Для некоторых типов плоских статически определимых балочных ферм такое решение получено [5] – [12]. Также существуют аналитические решения (более громоздкие) и для пространственных систем [13], [14], и для статически неопределимых [15]. У аналитических решений есть, кроме всего прочего, одно преимущество перед численными: для ферм с большим числом панелей решение не теряет точность, в то время как численные методы имеют такой недостаток.

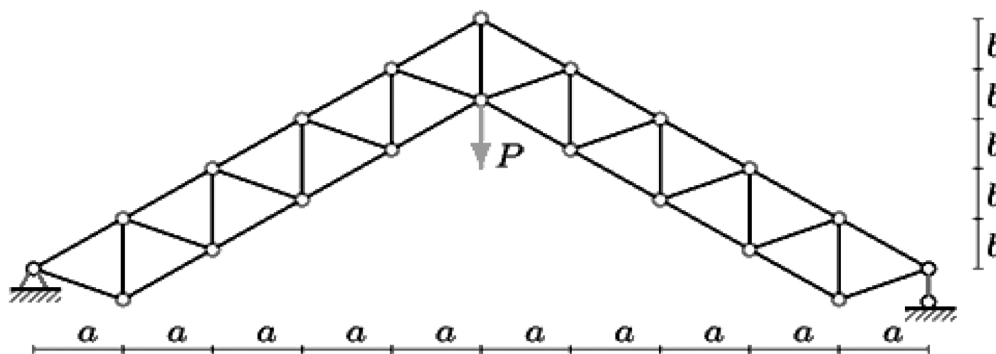


Рис. 1. Нагружение центрального узла фермы при $n = 5$

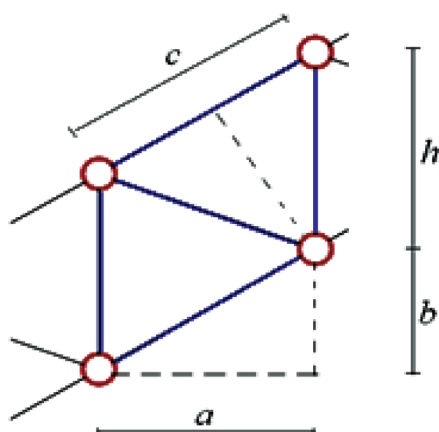


Рис. 2. Панель фермы длиной a

Наличие современных аналитических программ Maple, Mathematica, MathCad, Maxima и др., дающих решение в символьном виде без потери точности, может ввести исследователя в заблуждение о возможностях этих систем. Однако опыт их использования показывает, что здесь имеется ограничение другого рода – время счета. Если ставится задача получить точное решение для ферм с большим числом панелей (a , следовательно, и с большой матрицей системы линейных уравнений метода вырезания узлов), то обнаруживается, что, начиная с некоторого числа стержней, время счета становится нереально большим. Таким образом, остается единственный метод преодоления «проклятия больших размерностей» – метод индукции.

Пользуясь отработанной методикой индуктивного получения формул для прогиба фермы и усилий в ее стержнях, решим задачу для предлагаемой фермы. Метод состоит в решении ряда задач в аналитическом виде, получении последовательностей коэффициентов при заданных параметрах конструкции или их степенях и нахождении их общих членов.

Основная часть

Ферма, содержащая n панелей в пролете (опорная панель с тремя стержнями входит в это число), имеет $2n - 2$ стержней нижнего пояса, $2n$ — верхнего, $2n - 1$ стоек и $2n$ раскосов. Всего в ферме $m = 8n$ стержней, включая три опорные стержня, моделирующие опоры фермы – неподвижную слева и подвижную справа. Эти стержни примем жесткими. Ферма содержит $4n$ узлов. Таким образом, система статически определимая: записывая по два уравнения равновесия для каждого узла (в проекции на оси координат), получим $8n$ уравнений для $8n$ неизвестных усилий

в стержнях. Пронумеруем шарниры фермы слева направо сначала по нижнему, затем по верхнему поясу. Выберем начало координат в левой неподвижной опоре и введем в программу системы Maple координаты узлов:

$$\begin{aligned}x_i &= ai, \quad i = 1, \dots, 2n-1; \\y_i &= (i-1)b, \quad i = 1, \dots, n, \quad y_i = (2n-1-i)b, \quad i = n, \dots, 2n-1; \\x_{i+2n-1} &= (i-1)a, \quad i = 1, \dots, 2n+1; \\y_{i+2n} &= y_i + h, \quad i = n, \dots, 2n-1; \\y_{2n} &= y_{2n+1} - b, \quad y_{4n} = y_{4n-1} - b,\end{aligned}$$

Структуру решетки фермы введем конфигурационными векторами $\bar{V}_i, i = 1, \dots, m$. Первая компонента этих векторов – номер шарнира фермы в условном начале этого вектора, вторая – номер шарнира в его конце. Выбор направления векторов не связан с усилиями или со знаками усилий и просто определяют структуру соединений стержней фермы, необходимую для составления уравнений равновесия узлов (шарниров).

Для стержней нижнего пояса имеем следующие векторы: $\bar{V}_i = [i, i+1], i = 1, \dots, 2n-2$:

– верхнего пояса: $\bar{V}_{i+2n-2} = [i-1+2n, i+2n], i = 1, \dots, 2n$;

– стойки решетки: $\bar{V}_{i+4n-2} = [i, i+2n], i = 1, \dots, 2n-1$;

– раскосы решетки: $\bar{V}_{i+6n-3} = [i, i+2n-1], \bar{V}_{i+7n-3} = [i+n-1, i+3n], i = 1, \dots, n$.

При вычислении косинусов углов усилий в уравнениях равновесия метода вырезания узлов фермы, записанных в проекциях на оси координат, необходимы длины стержней и проекции векторных представлений этих стержней:

$$l_i = \sqrt{l_{1,i}^2 + l_{2,i}^2}; \quad l_{1,i} = x_{V_{2,i}} - x_{V_{1,i}}; \quad l_{2,i} = y_{V_{2,i}} - y_{V_{1,i}}; \quad i = 1, \dots, m,$$

где m – число стержней фермы.

Первый индекс в номере $V_{j,i}$ принимает значения 1 или 2 и соответствует номеру компоненты вектора $\bar{V}_i$, второй – номер стержня.

Матрица направляющих косинусов $\mathbf{G}$ имеет следующие элементы:

$$G_{k,i} = -l_{j,i} / l_i; \quad k = 2V_{i,2} - 2 + j; \quad k \leq m, \quad j = 1, 2; \quad i = 1, \dots, m;$$

$$G_{k,i} = l_{j,i} / l_i; \quad k = 2V_{i,1} - 2 + j; \quad k \leq m; \quad j = 1, 2; \quad i = 1, \dots, m.$$

Задача определения усилий в стержнях фермы сводится к решению системы линейных уравнений, которую запишем в матричной форме:

$$\mathbf{G}\bar{\mathbf{S}} = \bar{\mathbf{B}},$$

где $\bar{\mathbf{B}}$ – вектор нагрузок длиной m ; $\bar{\mathbf{S}}$ – вектор неизвестных усилий.

Горизонтальные нагрузки, приложенные к узлу i , заносятся в нечетные элементы B_{2i-1} , вертикальные – в четные B_{2i} . Решение данной задачи удобнее находить с помощью обратной матрицы $\bar{\mathbf{S}} = \mathbf{G}^{-1}\bar{\mathbf{B}}$.

Этот метод хорошо реализуется в системе Maple [16], [17], не требуя повторного решения системы при изменении нагрузки. В данной задаче таких нагрузок две: внешняя нагрузка и единичная сила по направлению искомого прогиба.

Прогиб определяем по формуле Максвелла – Мора:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{m-3} \frac{S_{i,P} S_{i,1} l_i}{EA}, \quad (1)$$

где $S_{i,P}$ – усилие в стержне i от действия внешней нагрузки; $S_{i,1}$ – усилие в стержне i от действия единичной силы по направлению искомого перемещения.

В данном случае единичная сила прикладывается в середине пролета к узлу нижнего пояса. Рассчитывая по формуле (1) прогиб в фермах с различным числом панелей ($n = 1, \dots, 8$), замечаем общий вид формулы для прогиба и получаем последовательность коэффициентов при c^2b^4 , c^6 и c^3b^3 . С помощью оператора `rgf_findrecur` из пакета `genfunc` системы Maple получим рекуррентные уравнения для этих коэффициентов. Например, для коэффициента при c^3b^3 , который обозначим K_3 , имеем следующее уравнение:

$$K_{3,n} = 4K_{3,n-1} - 6K_{3,n-2} + 4K_{3,n-3} - K_{3,n-4}.$$

Решение этого уравнения (общий член последовательности) находим с помощью оператора `rsolve`, встроенного в систему и не требующего подключения специального пакета. В результате получим искомую формулу для относительного прогиба $\tilde{\Delta} = \Delta EF / P$ при $n > 1$,

$$\tilde{\Delta} = \frac{1}{8bc^4} (K_1 c^2 b^4 + K_2 c^6 + K_3 c^3 b^3), \quad (2)$$

где $K_1 = 16n^2$; $K_2 = 4n - 5$; $K_3 = 16n(1 + 2n^2) / 3$; $c = \sqrt{a^2 + b^2}$.

Собственный вес конструкции можно смоделировать узловой нагрузкой, приложенной к нижнему или верхнему поясу либо к обоим поясам одновременно. Практика показывает, что результат во всех трех вариантах нагрузки получается приблизительно одинаковым. Пусть нагрузка приложена к нижнему поясу (рис. 3).

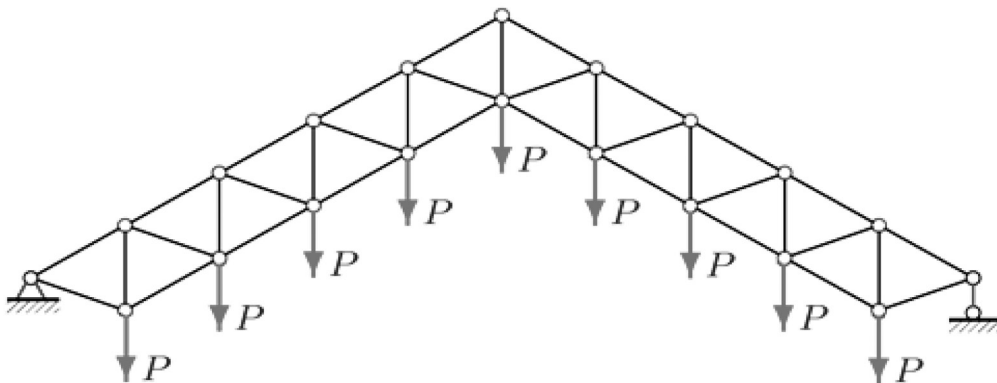


Рис. 3. Нагружение нижнего пояса фермы при $n = 5$

Формула для прогиба середины пролета имеет тот же вид, что и формула (2), отличаясь лишь коэффициентами, которые при таком нагружении имеют следующий вид:

$$K_1 = 16n^3; \quad K_2 = 4n^2 - 10n + 11; \quad K_3 = 8n^2(1 + 5n^2) / 3.$$

Заметим, что в этом случае для нахождения закономерности потребовалась последовательность длиной 14, в то время как при нагружении одной силой можно было обойтись всего лишь восьмью членами. Найденная закономерность справедлива при $n > 2$.

Рассмотрим ферму заданного пролета $L = 2na = 300$ м. Зависимость (2) прогиба от числа панелей обнаруживает минимум, как в случае нагружения фермы силой в середине пролета (рис. 4 а, первый вариант нагрузки), так и в случае равномерной нагрузки по нижнему поясу (рис. 4 б, второй вариант нагрузки).

Во втором варианте принимается, что суммарная нагрузка P_s на ферму не меняется при изменении числа панелей: $P_s = (2n - 1)P$, $\tilde{\Delta} = \Delta EF / P_s$. Отметим также несколько неожиданный максимум кривых на рис. 4. а и меньший прогиб (при той же величине нагрузки) в случае равномерного ее распределения по нижней панели (рис. 4б). Этот максимум имеет сугубо теоретическое значение, так как для выбранной гипотетической длины фермы в 300 м практическое число панелей начинается с 20 – 30, так, чтобы длина панели не превышала 5 – 10 м. Аналогичные кривые, построенные

по формуле (2) для ферм с более реальной длиной 20 – 100 м не имеют каких-либо особенностей и представляют собой монотонно возрастающие зависимости прогиба от числа панелей.

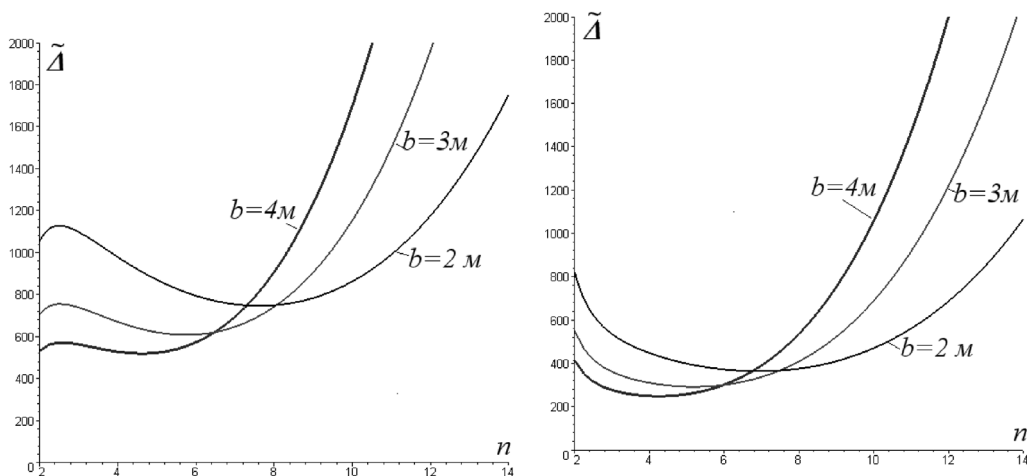


Рис. 4. Нагружение центрального узла фермы (а), нагружение её нижнего пояса (б)

Кривые зависимости прогиба от числа панелей при больших n приближаются к кубической параболе. Действительно, при нагружении центрального узла имеем $\lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{\Delta} = 4b/3$ и при загрузке нижнего пояса $\lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{\Delta} = 5b/6$. Операцию вычисления предела выполняет оператор $\text{limit}(\text{Delt}/n^3, n=\text{infinity})$ системы Maple.

Выводы

Индуктивным методом с применением системы компьютерной математики получены формулы для прогиба фермы арочного типа. Основной трудностью при этом было найти зависимость решения от числа панелей. Такая зависимость делает найденные формулы значительно более универсальными, позволяя выполнить также некоторые асимптотические исследования. В частности, показано, что кривая прогиба имеет кубическую зависимость от числа панелей при достаточно большом их числе.

Система Maple в решении потребовалась в двух случаях: при получении решения в символьной форме и для решения рекуррентных уравнений для определения общего члена последовательностей. Сами же результаты могут быть использованы, с одной стороны, инженерами-практиками для простой оценки жесткости конструкции, с другой – программистами, так как это надежная и простая тестовая оценка.

Для теоретиков пригодится сам алгоритм индуктивного вывода формул. Кроме того, в дальнейшем в качестве развития этой темы можно ввести в решение параметры жесткости поясов и решеток и провести оптимизацию конструкции по прочности и жесткости. В процессе решения данной задачи были получены также формулы для усилий во всех стержнях в аналитическом виде. Здесь они не приведены в силу их громоздкости, однако при необходимости эти зависимости могут быть использованы для оценки прочности фермы из условия потери устойчивости сжатых элементов и достижения предельных усилий в растянутых стержнях. Оптимизация фермы – благодатная тема для исследователя. Помимо классических методов [18] – [20] оптимизации формы поясов и распределения материала по стержням в последнее время развиваются подходы, основанные на методах искусственного интеллекта [21] – [24]. В этих методах точные аналитические решения также могут быть полезны для ускорения сходимости процесса и оценки полученного решения.

Список литературы

1. Барановский М. Ю. Стандартизированные ферменные конструкции с уклоном 10 % пролетами 24, 30, 36 метров / М. Ю. Барановский, В. А. Тарасов // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2014. — № 7 (22). — С. 92–106.
2. Марутян А. С. Оптимизация высот стропильных перекрестных стальных ферм / А. С. Марутян // Строительная механика и расчет сооружений. — 2014. — № 4 (255). — С. 25–34.
3. Кузнецов И. Л. Новые конструктивные решения стальных каркасов легких многопролетных зданий / И. Л. Кузнецов, М. А. Салахутдинов, Л. Р. Гимранов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2011. — № 1 (15). — С. 88–92.
4. Марутян А. С. Минимальная высота стальных ферм и их перекрестных систем, включая модули покрытий и перекрытий типа «Пятигорск» / А. С. Марутян, М. Б. Григорьян // Современная наука и инновации. — 2013. — № 1. — С. 52–62.
5. Реутов Д. О. Индуктивный анализ прогиба фермы регулярной структуры в системе Maple / Д. О. Реутов // Междунар. науч.-практ. конференция ИТОН-2014. IV-й междунар. семинар и междунар. школа «Математическое и компьютерное моделирование фундаментальных объектов и явлений в системах компьютерной математики»: материалы конф. и тр. семинара. — Казань: Изд-во ООО «Фолиант», 2014. — С. 256–261.
6. Ахмедова Е. Р. Частотное уравнение для плоской балочной фермы регулярной структуры с треугольной решеткой / Е. Р. Ахмедова, М. И. Канатова // Междунар. науч.-практ. конф. ИТОН-2014. IV-й междунар. семинар и междунар. школа «Математическое и компьютерное моделирование фундаментальных объектов и явлений в системах компьютерной математики»: материалы конф. и тр. семинара. — Казань: Изд-во ООО «Фолиант», 2014. — С. 198–199.
7. Кужелев П. А. Оптимизация прогиба плоской балочной фермы / П. А. Кужелев // Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты: сб. науч. тр. по материалам междунар. научно-практ. конф. 31 мая 2014 г.: в 11 ч. — Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. — С. 109–110.
8. Дзабиев А. А. Формулы для расчета прогиба арочной фермы / А. А. Дзабиев, С. П. Черепанов // Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. 31 мая 2014 г.: в 11 ч. — Ч. 4. — Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. — С. 63–64.
9. Бадертдинов Р. Р. Формула для прогиба плоской балочной фермы / Р. Р. Бадертдинов // Актуальные вопросы образования и науки: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. 30 сентября 2014 г.: в 11 ч. — Ч. 7. — Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. — С. 21–22.
10. Афанасьев В. А. Прогиб составной плоской балочной фермы с параллельными поясами / В. А. Афанасьев, О. О. Бойко // Актуальные вопросы образования и науки: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. 30 сентября 2014 г.: в 11 ч. — 2014. — С. 15–16.
11. Реутов Д. О. Аналитическое выражение прогиба слабо вваренной балочной фермы / Д. О. Реутов // Наука и образование в XXI веке: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. 31 октября 2014 г.: в 17 ч. — Ч. 3. — Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. — С. 128–129.
12. Заборская Н. В. О горизонтальном смещении опоры плоской балочной фермы / Н. В. Заборская // Перспективы развития науки и образования: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. Конф. 28 февраля 2015 г.: в 13 ч. — Ч. 9. — Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. — С. 58–60. DOI: 10.17117/2015.02.28.09.
13. Кирсанов М. Н. Изгиб, кручение и асимптотический анализ пространственной стержневой консоли / М. Н. Кирсанов // Инженерно-строительный журнал. — 2014. — № 5 (49). — С. 37–43.
14. Кирсанов М. Н. Анализ прогиба фермы прямоугольного пространственного покрытия / М. Н. Кирсанов // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 1 (53). — С. 32–38.
15. Кирсанов М. Н. Аналитический расчет многорешетчатой фермы / М. Н. Кирсанов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2014. — № 6. — С. 2–6.
16. Кирсанов М. Н. Maple и Maplet. Решения задач механики / М. Н. Кирсанов. — СПб.: Лань, 2012. — 512 с.
17. Голоскоков Д. П. Практический курс математической физики в системе Maple / Д. П. Голоскоков. — СПб.: Изд-во ПаркКом, 2010. — 644 с.

18. Heyman J. Design of a simple steel truss / J. Heyman // Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings. — 2010. — Vol. 163. — No. 1. — P. 53–56.
19. Hutchinson R. G. The structural performance of the periodic truss / R. G. Hutchinson, N. A. Fleck // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 2006. — Vol. 54. — Issue 4, April — P. 756–782.
20. Алпатов В. Ю. Оптимизация геометрической формы пространственно-стержневых конструкций / В. Ю. Алпатов, И. С. Холопов // Металлические конструкции. — 2009. — Т. 15. — № 1. — С. 47–57.
21. Camp C. V. Design of space trusses using modified teaching-learning based optimization / C. V. Camp, M. Farshchin // Engineering Structures. — 2014. — Vol. 62–63. — No. 3 — P. 87–97.
22. Kaveh A. Optimal structural design family by genetic search and ant colony approach/ A. Kaveh, M. Shahrouzi // Engineering Computations. — 2008. — Vol. 25. — No. 3. — P. 268–288.
23. Sonmez M. Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss structures / M. Sonmez // Applied Soft Computing. — Vol. 11. — 2011. — P. 2406–2418.
24. Кирсанов М. Н. Генетический алгоритм оптимизации стержневых систем / М. Н. Кирсанов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2010. — № 2. — С. 60–63.

УДК 519.63: 539.384: 629.12

А. В. Анненков,
асп.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЗАЩЕМЛЕННОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ, СЖАТОЙ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ

EXPLORE OF STABILITY OF CLAMPED RECTANGULAR PLATE, COMPRESSED IN ONE DIRECTION

Рассмотрена защемленная по контуру прямоугольная пластина, сжимаемая в ее плоскости равномерно распределенной нагрузкой, приложенной к двум противоположным граням. Аналитическое решение построено для определения симметричных закритических форм равновесия. Каждое решение выбирается в виде суммы двух гиперболическо-тригонометрических рядов по двум координатам. Проблема сводится к бесконечной однородной системе относительно коэффициентов рядов. Эта система в качестве параметра содержит интенсивность сжимающих усилий. Критическими усилиями считаются те, при которых коэффициенты рядов наиболее быстро устремляются в бесконечность при одном и том же числе итераций. Найдены численные результаты спектра критических нагрузок для квадратной пластины. В качестве равновесных усилий принимаются те из них, при которых коэффициенты последующих итераций практически не отличаются друг от друга. Получены графические формы равновесия пластины.

Edges of rectangular plate is compressed in its plane evenly distributed load applied to the two opposite sides. An analytical solution is constructed to determine the symmetric supercritical forms of equilibrium. Each solution is chosen as a sum of two hyperbolic-trigonometric series by two coordinates. The problem is the development of the final homogeneous system relative to the coefficients of the series. This system parameter contains the intensity of the compression forces. Critical efforts are those in which the coefficients of the series most quickly rush to infinity with the same number of iterations. Numerical results of finding the spectrum of critical loads for square plates. As the equilibrium efforts are those in which the coefficients of the subsequent iterations do not differ from each other. Achieved forms of equilibrium are presented graphically.

Ключевые слова: прямоугольная защемленная пластина, устойчивость, гиперболическо-тригонометрические ряды, критические нагрузки, формы равновесия.

Key words: rectangular clamped plate, stability, hyperbolic-trigonometric series, critical value, forms of equilibrium.

РАЗРУШЕНИЕ различных металлоконструкций (судовых, гидротехнических и др.) во многих случаях происходит из-за потери устойчивости плоских элементов обшивки, палубного настила, переборок, несущих балок и т. п. Зачастую исследователи при расчетах на устойчивость ограничиваются определением лишь первой (эйлеровой) критической нагрузки. Однако при упругой потере устойчивости несущая способность пластины не исчерпывается полностью, пластина и при дальнейшем увеличении нагрузок может оставаться в работоспособном состоянии. Поэтому практический интерес вызывает и закритическое поведение пластины под действием сжимающих усилий в её плоскости, т. е. определение спектра последующих критических нагрузок и форм равновесия. Задачей исследования является получение достоверных численных результатов о величинах критических нагрузок и формах равновесных состояний при одностороннем сжатии прямоугольной панели.

В работе [1] найдено симметричное решение задачи устойчивости прямоугольной пластины, жёстко заделанной по всем граням для случая всестороннего сжатия. Рассмотрим одностороннее сжатие равномерной нагрузкой T_x (рис. 1).

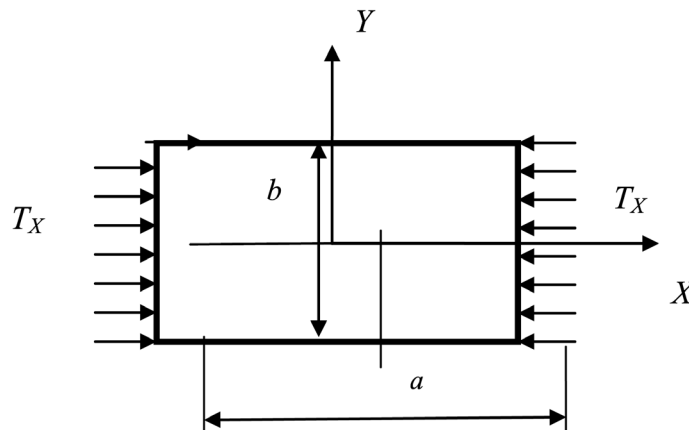


Рис. 1. Защемленная по контуру пластина при продольной сжимающей нагрузке

Дифференциальное уравнение изгиба такой пластины описывается следующим образом [2]:

$$\nabla^2 \nabla^2 w + T_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

где ∇^2 – двумерный оператор Лапласа; w – прогиб срединной поверхности пластины; $T_x = T_x b^2 / D$ – относительные сжимающие усилия; $x = X / b$, $y = Y / b$ – безразмерные координаты, $D = Eh^3 / [12(1 - \nu^2)]$ – цилиндрическая жёсткость; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; относительные размеры пластины: $-\gamma / 2 \leq x \leq \gamma / 2$, $-1 / 2 \leq y \leq 1 / 2$, $\gamma = a / b$ – отношение сторон.

Граничные условия данной задачи есть условия отсутствия прогибов и углов поворота заделанных сечений.

Постановка задачи:

- найти выражение функции прогибов $w(x, y)$, удовлетворяющее уравнению (1) и граничным условиям;
- определить значения сжимающих усилий $T_{кр.}$ (критические значения), при которых панель выходит из состояния устойчивости;
- определить значения сжимающих усилий $T_{равн.}$ (равновесные значения), при которых панель принимает новую форму устойчивого равновесия;
- найти интервалы устойчивого и неустойчивого состояния пластины.

Из бесконечного ряда критических значений и равновесных форм наиболее значимы с практической точки зрения первые две-три критические нагрузки и равновесные формы. С математической точки зрения интересно найти некоторую последовательность критических нагрузок;

полученные значения нагрузок могут быть использованы в будущем при появлении и использовании новых материалов.

Задача устойчивости защемлённой по всему периметру прямоугольной панели не имеет точного решения в замкнутой форме, поэтому некоторые исследователи ограничивались лишь поиском первого приближения. Цель настоящей работы заключается в том, чтобы получить новые достоверные численные значения нагрузок.

Четное (симметричное) решение задачи представлено суммой двух рядов [1]:

$$w(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} (a_k \operatorname{ch} \alpha_k x + b_k \operatorname{ch} \beta_k x) \cos \lambda_k y + \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{s}} (c_s \operatorname{ch} \xi_s y + d_s \operatorname{ch} \eta_s y) \cos \mu_s x, \quad (2)$$

где $\lambda_k = k\pi$; $\mu_s = s\pi / \gamma$; $\tilde{k} = (k+1)/2$; $\tilde{s} = (s+1)/2$; a_k, b_k, c_s, d_s – неопределённые коэффициенты.

$$\alpha_k, \beta_k = \sqrt{0,5 \left[2\lambda_k^2 - T_x \pm \sqrt{T_x^2 - 4\lambda_k^2 T_x} \right]}; \quad (3)$$

$$\xi_s, \eta_s = \sqrt{\mu_s^2 \pm \mu_s \sqrt{T_x}}. \quad (4)$$

Знак «плюс» перед внутренним корнем относится к первому коэффициенту в левой части, «минус» – ко второму.

Отметим, что значения ранее указанных корней могут быть как действительными, так и комплексными, однако решение и в последнем случае будет действительным. Функция (2) удовлетворяет уравнению (1) и условию отсутствия прогибов заделанных сечений. Эйлера нагрузка должна быть получена именно при четном решении, так как последующая за ней форма устойчивого равновесия будет такой же, как при изгибе пластины равномерной поперечной нагрузкой.

При удовлетворении всем граничным условиям получена бесконечная система линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов a_k, b_k, c_s, d_s , которая затем была приведена к бесконечной однородной системе относительно одной последовательности коэффициентов a_k :

$$a_k = \frac{32T_x \lambda_k^2}{\gamma \varphi_k} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\mu_s^3}{\theta_s (\xi_s^2 + \lambda_k^2)(\eta_s^2 + \lambda_k^2)} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sqrt{T_x - 4\lambda_m^2}}{(\alpha_m^2 + \mu_s^2)(\beta_m^2 + \mu_s^2)} a_m, \quad (5)$$

где $a_m = a_k \lambda_k \operatorname{ch} \alpha_k^*$; $\varphi_k = \alpha_k \operatorname{th} \alpha_k^* - \beta_k \operatorname{th} \beta_k^*$, $\theta_s = \xi_s \operatorname{th} \xi_s^* - \eta_s \operatorname{th} \eta_s^*$;

$$\alpha_k^* = \alpha_k \gamma / 2, \quad \beta_k^* = \beta_k \gamma / 2, \quad \xi_s^* = \xi_s / 2, \quad \eta_s^* = \eta_s / 2.$$

Остальные коэффициенты рядов (2) выражаются через a_k :

$$b_k = -a_k \operatorname{ch} \alpha_k^* / \operatorname{ch} \beta_k^*; \quad d_s = -c_s \operatorname{ch} \xi_s^* / \operatorname{ch} \eta_s^*; \quad c_s = -d_s \operatorname{ch} \xi_s^* / \operatorname{ch} \eta_s^*.$$

Представление бесконечной системы в форме (5) позволяет находить коэффициенты a_k методом последовательных приближений, полагая, например, в качестве начального приближения все $a_m = 1$. Система (5) в качестве параметра содержит величину сжимающих усилий T_x , которая должна быть подобрана такой, чтобы получить нетривиальные решения системы. Если значения сжимающих усилий T_x находятся в зоне устойчивости пластины, то итерационный процесс приводит к стандартному решению. Начиная с некоторого значения T , наблюдается неограниченный рост коэффициентов a_k , что означает наступление интервала неустойчивого состояния пластины. Вычисления показали, что интервал неустойчивости, сопровождающийся ростом прогибов пластины, может быть достаточно протяжённым и включать в себя критическую нагрузку или две-три критические нагрузки в одной зоне, которая даёт резкий бесконечный рост прогибов панели. В интервале неустойчивого состояния бесконечная система (5) даёт расходящееся решение с меньшей или большей скоростью расхождения.

Для организации вычислительного процесса была составлена программа в *Maple*. В качестве примера рассчитывалась квадратная пластина ($\gamma = 1$). Число членов в рядах было равно 59 (от этого числа зависит и размер укороченной системы (5)). Этого количества членов было достаточно

для достижения точности вычислений до пятого знака. На печать выводились все коэффициенты для каждой итерации. Зоны устойчивого и неустойчивого состояния, критические и равновесные нагрузки определялись достаточно быстро перебором значений T_x с учётом поведения коэффициентов a_k по итерациям.

Отметим, что при любой нагрузке из интервала неустойчивого состояния пластина может потерять устойчивость при длительном её воздействии, однако вблизи концов интервала это маловероятно (здесь следует учитывать силы внутреннего трения и кратковременность воздействия). В качестве критических значений усилий принимались наиболее опасные значения, т. е. те, при которых коэффициенты с наибольшей скоростью устремлялись к бесконечности при одинаковом числе итераций.

Значения T_x , при которых получалось нетривиальное конечное решение (т. е. когда соответствующие коэффициенты последующих итераций практически не отличались друг от друга), принимались в качестве равновесных значений, а найденные при этих значениях формы прогибов поверхности пластины представляли собой формы ее равновесия.

Так как решение выполнялось в виде суммы двух гипербола-тригонометрических рядов по двум координатам (2), которые моделирует свободно опёртые параллельные кромки, то кроме критических и равновесных значений, также имеются особые значения усилий. Это значения $T_x = (\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2 / \mu_s^2$, при которых знаменатели формул (2) обращаются в нуль, но они, как показали исследования, являются лишь началом (или концом) зоны неустойчивого состояния защемленной пластины. Приведем первые пять особых значений нагрузки для квадратной панели:

$$4\pi^2 \approx 39,478; 100 \pi^2 / 9 \approx 109,662; 27,04 \pi^2 \approx 266,875; 36\pi^2 \approx 355,305; 46,24\pi^2 \approx 456,370.$$

Значения нескольких первых критических и равновесных нагрузок для квадратной пластины, а также диапазоны её устойчивого и неустойчивого состояния при симметричной деформации приведены в таблице (самая первая критическая нагрузка – «эйлерова» нагрузка).

**Критические и равновесные усилия при одностороннем сжатии
квадратной пластины для симметричного решения**

Диапазон усилий T_x	$T_{кр}$	Форма пластины	$T_{равн}$
0 – 39,478	–	Устойчивая плоская	–
39,478 – 99,426	66,553 ; 84,923	Неустойчивая	–
99,426	–	Равновесная	99,426
99,426 – 109,662	–	Устойчивая плоская	–
109,662 – 192,112	117,624; 179,552	Неустойчивая	–
192,112	–	Равновесная	192,112
192,112 – 266,875	–	Устойчивая плоская	–
266,875 – 274,7	271,058	Неустойчивая	–
274,7 – 355,305	–	Устойчивая плоская	–
355,305 – 456,370	375,879; 391,41; 449,464	Неустойчивая	–
456,370 – 470,822	–	Устойчивая плоская	–
470,822	–	Равновесная	470,822

На рис. 2 приведены первые три чётные формы равновесного состояния квадратной пластины, равномерно сжатой вдоль оси Ox .

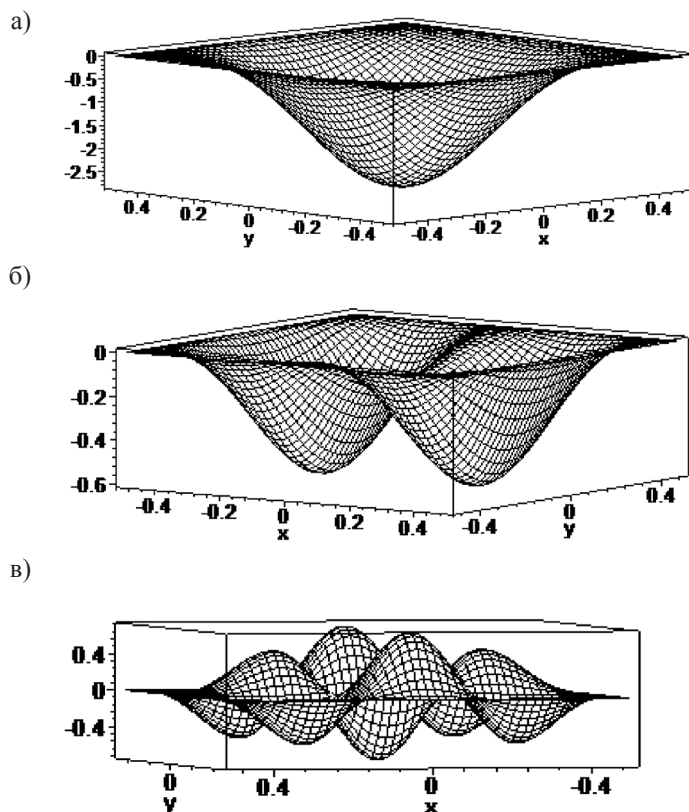


Рис. 2. Формы равновесного состояния квадратной пластины при одностороннем сжатии:

$$a - T_{\text{равн.1}} = 99,426; \text{ б} - T_{\text{равн.2}} = 192,112; \text{ в} - T_{\text{равн.3}} = 470,822$$

Первая форма равновесного состояния имеет одну выпучину (рис. 2 а) и соответствует виду изогнутой поверхности пластины от действия равномерной поперечной нагрузки, вторая – две выпучины (рис. 2 б), третья – имеет четыре выпучины в одну сторону и пять выпучин в другую (рис. 2 в).

В работе [3] получено значение «эйлеровой» нагрузки для квадратной пластины, равное $10,07\pi^2 \approx 99,387$. Оно практически совпадает с полученным в настоящей работе первым равновесным усилием 99,426, а найденное «эйлерово» значение получилось существенно ниже, чем в [3] – 66,553. За ним следует второе критическое усилие 84,923. Причина, на наш состоит в том, что в работе [3] в качестве критического усилия принималось то, которое обеспечивает равенство энергии деформации при изгибе и работы внешних сил. Правильнее считать его именно равновесным усилием. Критическое состояние сопровождается «хлопком» – резким изменением формы пластины, что в рамках данной теории означает бесконечный рост её прогибов. Физически при «эйлеровом» значении, равном 66,553, форма потери устойчивости пластины подобна приведенной на рис. 2 а. При достижении второго критического усилия, равного 84,923, пластина хлопком меняет направление выпученности на противоположное и затем с ростом усилий приходит к равновесной форме при значении, равном 99,426.

В публикации [4] «эйлерова» нагрузка составила $32\pi^2/3 \approx 105,27$, что является еще более завышенным приближенным значением. Оно получено методом Галеркина при удержании одного члена аппроксимирующего ряда. В других работах [5]–[8], посвященных этой задаче, отметим, что авторы также ограничивались отысканием только первой «эйлеровой» нагрузки.

В работе [9] рассматривалась задача сложного изгиба, когда кроме сдвигающих продольных нагрузок к пластине была приложена и равномерная поперечная нагрузка. Для одностороннего сжатия получены следующие значения критических усилий (первые два): 66,5; 117,5. Они практически совпадают с первым и третьим критическим значением, полученным в насто-

ящей работе. Отсутствие аналога второму критическому значению 84,923 объясняется наличием поперечной нагрузки, которая исключает возможность повторного «хлопка» в другую сторону. Поэтому можно сделать вывод о том, что наличие поперечной нагрузки практически не влияет на величину критических усилий в рамках теории тонких пластин Кирхгофа. Первое равновесное усилие, приведенное в работе [9], равно 100, также практически совпадает с найденным в настоящей работе. В данной работе рассмотрено только симметричное решение. Получены «эйлерова» критическая нагрузка и последующие четные критические нагрузки при условии упругих деформаций, равновесные усилия, а также найдены интервалы устойчивого и неустойчивого состояния пластины.

Для полной картины необходимо рассмотреть еще антисимметричное решение, а также симметричное по одной координате и антисимметричное по другой. Это, безусловно, дополнит характер закритического состояния пластины для более высоких значений сжимающей нагрузки. В работе [10] эти решения получены для двусторонних сжимающих усилий.

Выводы

Полученные результаты позволяют с высокой точностью найти критические продольные сжимающие нагрузки T_x для жёстко защемленных по всем краям прямоугольных пластин с различными значениями соотношения сторон, а также находить следующие за критическими формы равновесия и зоны устойчивого и неустойчивого состояний пластины. Вычислительный алгоритм может быть использован в практических расчетах на устойчивость плоских прямоугольных элементов судовых, гидротехнических и других конструкций.

Список литературы

1. Сухотерин М. В. Устойчивость сжатых панелей обшивки судна / М. В. Сухотерин, Т. П. Кныш, Л. В. Анненков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2. — С. 51–58.
2. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. — М.: Либроком, 2009. — 640 с.
3. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. — М.: Наука, 1967. — 984 с.
4. Алфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем / Н. А. Алфутов. — М.: Машиностроение, 1978. — 312 с.
5. Андрианов И. В. Асимптотические методы в теории колебаний балок и пластин / И. В. Андрианов, В. В. Данишевский, А. О. Иванков. — Днепрпетровск: ПГАСА, 2010. — 216 с.
6. Даревская Е. В. Устойчивость защемленной по контуру прямоугольной пластинки / Е. В. Даревская // Строительная механика и расчет сооружений. — 1982. — № 3. — С. 31–35.
7. Lanzo A. D. Asymptotic post-buckling analysis of rectangular plates by HC finite elements / A. D. Lanzo, G. Garcea, R. Casciaro // International Journal for numerical methods in engineering. — 1995. — Vol. 38. — P. 2325–2345.
8. Yamaky N. Post-buckling behavior of rectangular plates with small initial curvature loaded in edge compression / N. Yamaky // Journal Appl. Mech. ASME. — 1959. — Vol. 26. — P. 407–414.
9. Барышников С. О. Прочность, устойчивость, колебания плоских элементов судовых конструкций / С. О. Барышников, М. В. Сухотерин. — СПб.: Судостроение, 2012. — 167 с.
10. Сухотерин М. В. Определение спектра критических нагрузок и форм равновесия сжатых панелей обшивки корпуса судна / М. В. Сухотерин, Е. В. Потехина, Л. В. Анненков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — Вып. 2. — С. 44–52.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 528.422

Е. Н. Колосков,
асп.;

Ю. Г. Фирсов,
канд. техн. наук, доц.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РЕЛЬЕФА И ДОННОГО ГАЗОПРОЯВЛЕНИЯ В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ РОССИИ

IMPLEMENTATION OF THE NEW HYDROGRAPHIC TECHNOLOGIES FOR BOTTOM TOPOGRAPHY AND SEAFLOOR GAS VENTING INVESTIGATIONS IN THE RUSSIAN NORTHERN SEAS

Рассмотрены вопросы использования гидрографических информационных технологий для изучения дна северных морей России. Современная гидроакустическая аппаратура предоставляет широкие возможности для получения не только детальной топографии дна, но и дополнительной информации, касающейся структуры верхней части разреза донного грунта и наличия объектов в придонной водной толще. Приводятся методы использования гидроакустической аппаратуры для комплексного изучения дна. Подчеркивается решающее значение, которое приобретает выбор электронной гидрографической информационной системы и компьютерной системы окончательной обработки данных. Акцентируется внимание на том, что практическая направленность этих работ связана с изучением субмаринных газовых гидратов. Особое внимание уделено использованию акустических параметрических профилографов как средства для изучения тонкой структуры верхней части разреза морского дна. Отмечается актуальность выбора программы обработки результатов донного профилирования и рассматриваются вопросы совместного представления результатов площадной съемки и разрезов дна в виде трехмерных изображений (3D). Даются рекомендации по совместному использованию многолучевого эхолота и параметрического профилографа при выполнении гидрографических работ в арктических морях.

The study examines modern hydrographic technologies for the Russian northern seas investigations. The hydro acoustics methods for seabed study are discussed. Modern hydrographic equipment provides the possibility not only to obtain the detailed bathymetry but also additional information containing the presence of objects in the water column and sea bottom sections. The importance of the hydrographic software tools needed to process and analyze the bathymetry and water column data are emphasized. The practical importance of the water column and bottom profiler data processing for the submarine gas-hydrates survey is stated. The main attention is paid to the implementation of the parametric sub bottom profilers – the low frequency sonar for the sea bottom vertical section investigation. The ability for the integrated presentation of the multibeam bathymetry and vertical curtains in the 3D environment are discussed. Recommendations for the implementation of the multi beam echo sounder and parametric sub bottom profiler for the combined hydrographic and submarine gas-hydrates survey Russian northern seas are delivered.

Ключевые слова: гидрографические информационные технологии, гидроакустическая аппаратура, площадная съемка рельефа и разреза донного грунта, донное газопроявление, субмаринные газовые гидраты, субмаринная криолитозона, многолучевой эхолот, акустический параметрический донный профилограф.

Key words: hydrographic technologies, hydro acoustics methods, swathe survey, sea bottom vertical section, submarine gas-hydrates, submarine permafrost, seafloor gas venting, multi beam echo sounder, parametric sub bottom profiler.



СОВРЕМЕННЫЕ морские геологоразведочные работы, положившие начало новому этапу геологоразведки и эксплуатации природных ресурсов в российской Арктике, базируются преимущественно на результатах гидроакустических исследований дна. Состо-

яние геологической изученности Арктики и перспективы геологоразведочных работ приведены в работе [1]. Морскую геологию интересует как современный рельеф дна, так и осадочная толща, включая детальную информацию верхней части разреза дна. Данную информацию могут предоставлять современные гидрографические технологии. Актуальным направлением является выполнение инженерных геологических работ, в состав которых также входит детальное изучение поверхности и структуры дна.

В течение последних лет в российской Арктике открыты десятки нефтяных и газовых месторождений. Карта нефтегазовых месторождений западного сектора российской Арктики, расположенных на побережье и континентальном шельфе, приведена на рис. 1.

При освоении полярных месторождений углеводородного сырья на арктических побережьях и континентальном шельфе Российской Федерации формируется арктическая морская транспортная система экспорта нефти и газа. В настоящее время существуют и реализуются различные проекты прокладки многокилометровых газовых и нефтяных магистральных трубопроводов по дну арктического шельфа, строятся новые порты, выполняются дноуглубительные работы. На западном побережье Обской губы создан глубоководный порт Саббета. Для обеспечения функционирования порта в северной части Обской губы выполняются дноуглубительные работы для создания морского канала, при проектировании которого в 2011–2014 гг. были выполнены инженерные батиметрические съемки [5].

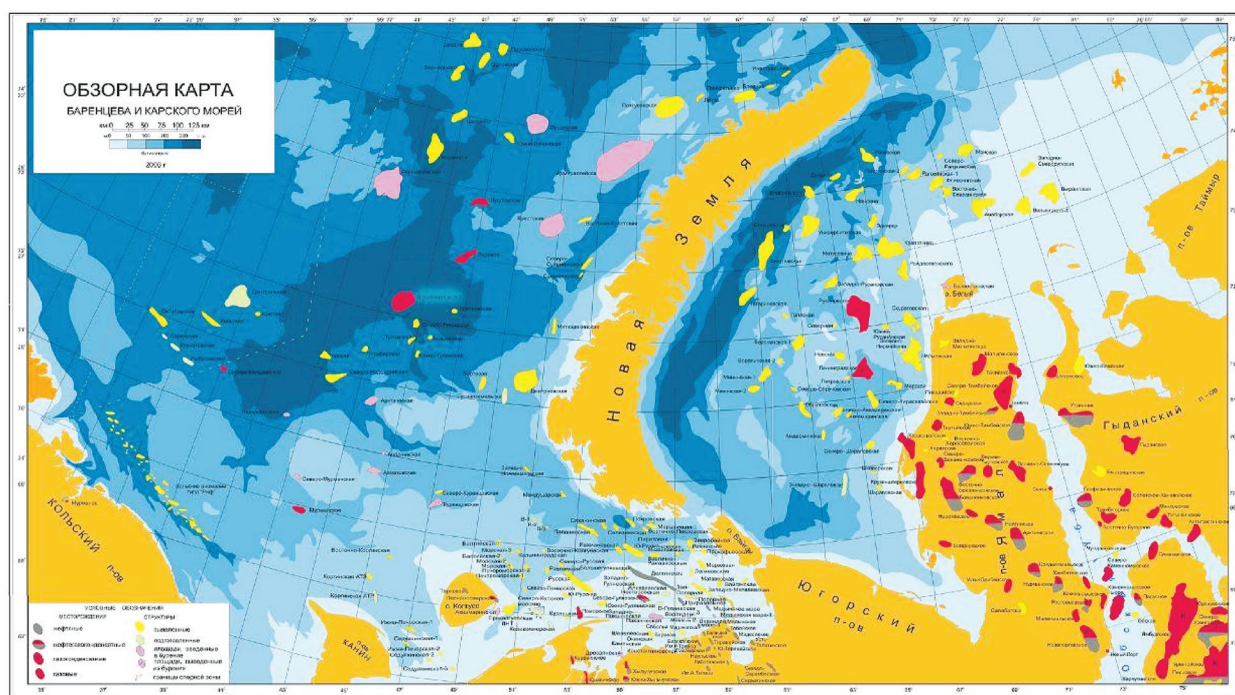


Рис. 1. Карта нефтегазовых месторождений западного сектора российской Арктики

В рамках выполнения подобных проектов важнейшей составляющей служит комплексная гидроакустическая съёмка дна с использованием многолучевых эхолотов (МЛЭ) и гидролокаторов бокового обзора. Применение МЛЭ является ведущей тенденцией в современной гидрографии. При этом основное внимание уделяется мелководным МЛЭ, способным работать на частотах в диапазоне от 200 до 400 кГц с использованием при этом линейно-частотной модуляции, и обеспечивать управление сектором излучения. Объемы батиметрической информации настолько велики, что возникает необходимость применять батиметрические цифровые модели рельефа, которые могут быть реализованы на основе регулярных сеток (гридов) и нерегулярных триангуляционных сеток. Большинство гидрографических пакетов программ используют батиметрические модели на основе гридов.

В течение последнего десятилетия гидрографические технологии съемки подводного рельефа претерпели радикальные изменения в части качества получаемых данных и возможности их наглядного объемного представления средствами компьютерной техники [4], [5]. Современный МЛЭ способен выдавать информацию по батиметрии, сонарное изображение дна, а также изображение водной толщи. Эти инновационные возможности недостаточно изучены и востребованы отечественной практикой. В российской гидрографической практике основное внимание до последнего времени уделялось батиметрии. Однако в связи с потребностью обеспечения морских геологоразведочных работ следует ожидать изменения подобной ситуации.

Вопросы батиметрического обеспечения морских геологоразведочных работ с одновременным получением и анализом придонных изображений водной толщи рассмотрены в работе [6]. При съемке использовался МЛЭ EM2040C фирмы «Kongsberg» с электронной гидрографической информационной системой (ЭГИС) QINSy фирмы «QPS». ЭГИС позволяет одновременно собирать и обрабатывать батиметрическую информацию для оперативной визуализации цифровой модели рельефа дна, сонарное изображение интенсивности обратного рассеивания дна, а также получать изображения объектов в водной толще.

Акватория работ включала Новоземельский трог в районе структуры «Университетская». При этом были зарегистрированы отдельные донные газопроявления. Изображения объектов в придонной водной толще, получаемые в ЭГИС QINSy в реальном масштабе времени, малоинформативны, поэтому требуется определенный опыт для идентификации таких «плюмов» и фиксации их планового положения с целью последующего выхода в точку газового проявления для взятия проб воды и донного грунта. Однако окончательная обработка зарегистрированной информации позволяет получать наглядные и реалистичные изображения. На рис. 2 представлено трехмерное изображение «плюма» газогидрата в среде программного пакета Fledermause на фоне цифровой модели рельефа (регулярная сетка размерностью 0,5 м).

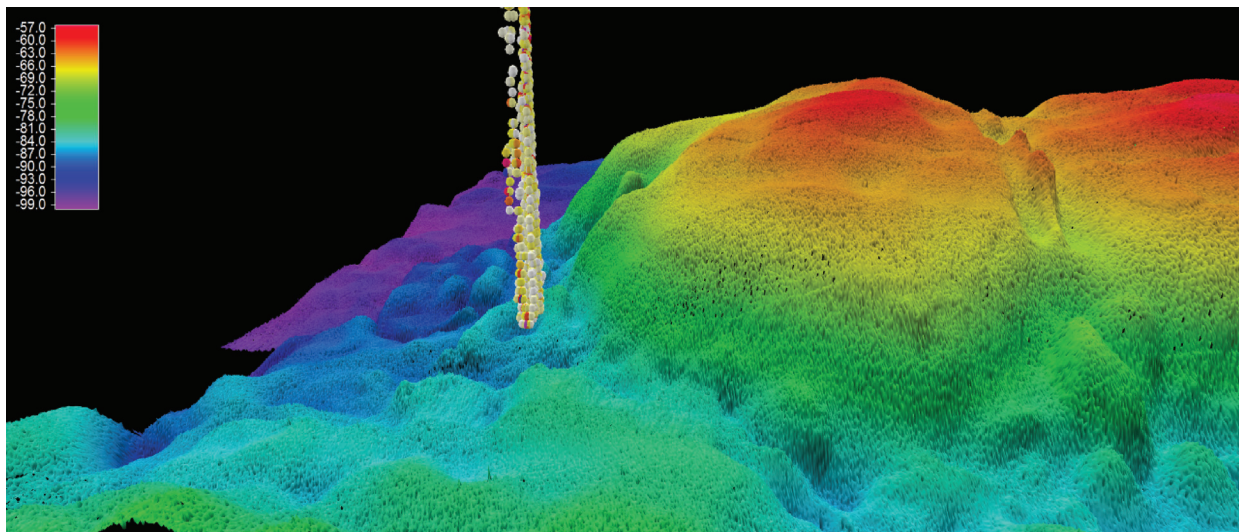


Рис. 2. Трехмерное изображение «плюма» газогидрата в среде программного пакета Fledermause на фоне цифровой модели рельефа

Детальная площадная съемка рельефа позволила выявить новые, ранее неизвестные формы топографии морского дна, в том числе формы, относящиеся к донному газопроявлению. По всей видимости, донное газопроявление в районе структуры «Университетская» является выходом газового гидрата (главным образом, метана) из толщи донных осадков, приуроченных к грязевулканическим структурам. Структуры имеют кольцевидную форму с небольшим (2 – 4 м) превышением и расположены по периферии подводной возвышенности, вершина которой расположена на глубине 40 м с превышением 30 – 40 м относительно окружающего сравнительно плоского рельефа. Такие формы рельефа напоминают *пинго* (*pingo*), в русской классифи-

кации *гидролакколиты*, или *булгунняхи*, – мерзлотные формы рельефа в виде куполообразных возвышений.

В отечественной специальной литературе систематическое изложение известных геологических данных о наблюдениях и признаках субмаринных газовых гидратов представлено в работе [2], в которой детально рассмотрены признаки газовых гидратов, выявленные по результатам анализа проб донных отложений, и имеются только отдельные упоминания об «эхолотных факелах», полученных на эхограмме однолучевого эхолота в Охотском море вблизи о. Парамушир [2, с. 61]. Газогидратное тело, как правило, представляет собой массивное образование, уходящее в толщу донных осадков на десятки и сотни метров. В отдельных районах Мирового океана газогидраты могут находиться под слоем осадков на глубине не менее 30 – 50 см от поверхности дна. Известны и поля газогидратов, лежащие на поверхности донных осадочных отложений, обнаруженные, например, на дне озера Байкал [7]. Фактически там найдены большие месторождения чистого природного газа. В районе грязевого вулкана, получившего название *Санкт-Петербург*, был обнаружен гидратный массив, выходящий непосредственно на поверхность дна и постоянно контактирующий с водой. Структура грязевого вулкана «Санкт-Петербург» была описана в 2000 г., а в 2005 г. на глубине 1400 м был обнаружен газовый факел высотой 900 м. Объемы залежей газогидратов в Байкале ученые оценивают наравне с запасами Ковыктинского месторождения в Иркутской области.

Интерес к субмаринным газогидратам впервые возник в последней четверти XX в. Мировым сообществом газогидраты рассматриваются в качестве перспективной альтернативы современного топлива. По оценкам специалистов [2], [13], [17], мировые запасы газогидратов содержат больше углеводорода, чем все разведанные на сегодня запасы нефти и газа. При этом следует иметь в виду, что газогидрат является возобновляемым ресурсом. В настоящее время во многих странах, включая США, Германию, Японию и Индию, ведутся исследования по поиску и разработке газогидратов [8], [10], [11], [14] – [16], [18], [19], [21] – [24]. Так, в Германии фирма «GEOMAR» занимается проблемой субмаринных газовых гидратов с 80-х гг. XX в. При этом существенной частью исследований, связанных с поисками газовых гидратов, является использование новейших гидроакустических средств, в первую очередь, МЛЭ. Результаты исследований по состоянию на 2002 г. были опубликованы в работе [12]. В США активные работы по изучению субмаринных газовых гидратов проводятся уже в течение более 30 лет. С 2000 г. эти работы координирует Национальный научно-исследовательский совет Национальной академии наук США в рамках нескольких программ, включая программу Министерства энергетики США [17]. Работы ведутся на шельфе североамериканского континента, включая Мексиканский залив [8], [10], [11], [15], [24], а также в Арктике [18], [21], [22].

В последние годы для поисков субмаринных газовых гидратов активно используются гидроакустические средства. Научно-исследовательское судно «Okeanos», принадлежащее Национальной администрации по океану и атмосфере США (NOAA), оборудованное МЛЭ ЕМ302, регулярно совершает исследовательские рейсы с целью поиска субмаринных газовых гидратов в Мексиканском заливе [15]. В целях гидроакустической визуализации последних разрабатывается специальное гидрографическое программное обеспечение [9], [11], [20].

Для России изучение субмаринных газовых гидратов имеет особое значение при проведении геологических и инженерно-геологических работ в арктических морях. Особенностью является то, что арктические шельфы характеризуются *субмаринной криолитозоной*, до недавнего времени обуславливающей стабильность гидратов. Формирование скоплений гидратов в этих условиях в основном контролируется *криогеногенетической моделью гидратообразования*, т. е. в гидратную форму переходит часть газов обычных залежей [2], [18], [21] – [23]. В связи общим потеплением Арктики и возможной деградацией субмаринной криолитозоны ситуация со стабильностью гидратов в грядущие годы может измениться весьма драматически.

В течение последних 20 – 25 лет зарубежные промышленно выпускаемые низкочастотные эхолоты-профилографы (ЭП) прочно вошли в арсенал средств российской морской геологии. При

этом хорошо зарекомендовали себя эхолоты-профилографы, использующие линейно-частотную модуляцию акустического сигнала низкой частоты (4 – 8 кГц). Одними из лучших образцов таких гидроакустических средств являются ЭП фирмы «EdgeTech» (США).

Известным эксплуатационным ограничением ЭП с линейно-частотной модуляцией являются существенные весогабаритные характеристики акустических антенн, препятствующие эксплуатации ЭП на арендованных судах. Наиболее рациональным решением является использование буксируемого варианта гидроакустической антенны, реализованного в ЭП модели «3100 EdgeTech». ЭП модели 3100 с буксируемой гидроакустической антенной типа 216 (масса в воздухе 80 кг) успешно эксплуатируется во ВНИИ «Океангеология» при проведении работ в Арктике с 2004 г.

Визуализация газопроявления в толще морского дна на ямальском шельфе Карского моря на профилограмме эхолота-профилографа «3100 EdgeTech» приведена на рис. 3. При эксплуатации ЭП с буксируемой гидроакустической антенной недостатком являются ограничения по скорости хода судна, составляющей, как правило, не более трех узлов, что существенно затрудняет возможность комплексирования с другими видами съемки, в первую очередь, с многолучевой съемкой рельефа. Методическим новшеством гидроакустического обеспечения морских геологоразведочных и инженерных геологических работ является комплексное применение МЛЭ с низкочастотным эхолотом-профилографом, принцип работы которого основан на нелинейной гидроакустике.

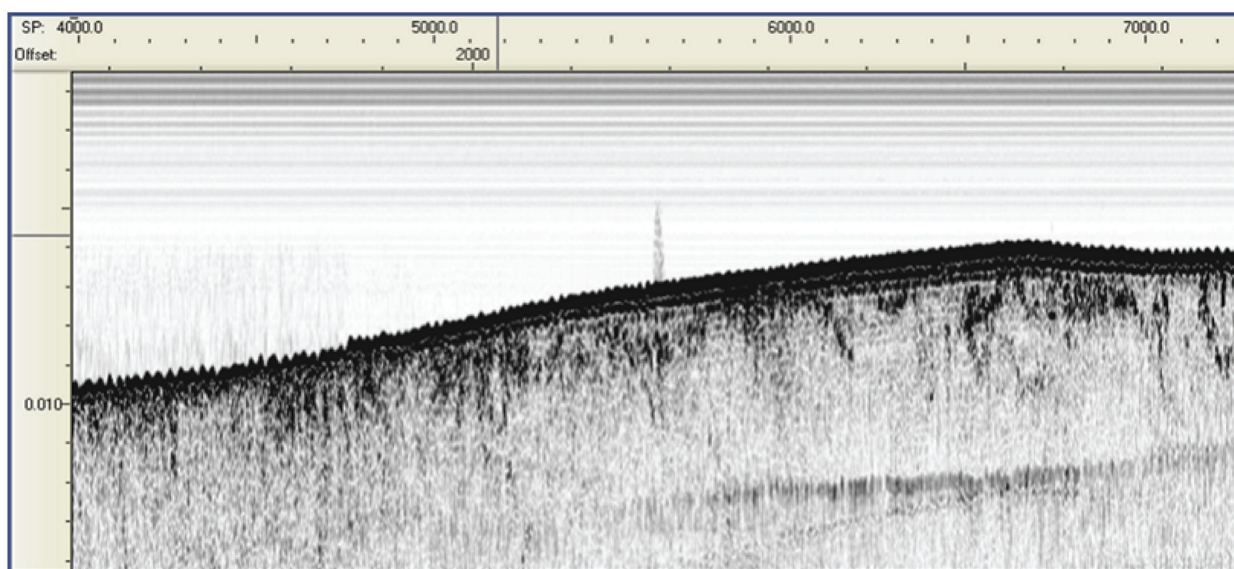


Рис. 3. Визуализация газопроявления в толще морского дна на ямальском шельфе Карского моря на профилограмме эхолота-профилографа «3100 EdgeTech» (ВНИИ «Океангеология»)

Значимым достижением гидроакустики последних лет явились практические результаты исследований в области нелинейной гидроакустики и внедрений параметрических антенн. Нелинейная гидроакустика использует так называемую *антенну накачки*. В антенну подается не один, а два синусоидальных электрических сигнала с частотами f_1 и f_2 , которые преобразуются в ультразвуковые колебания и появляются в водной среде в виде пучка волн с теми же частотами f_1 и f_2 . От квадратичной нелинейности (при возведении в квадрат суммы двух синусов) в каждой точке водной среды появляются сигналы с частотами $2f_1$, $2f_2$, $(f_1 + f_2)$ и, главное, возникает сигнал низкой разностной частоты $F = (f_2 - f_1)$. Все ультразвуковые волны накачки (удвоенные частоты либо сумма частот) быстро затухают с расстоянием, но волны разностной частоты $F = (f_2 - f_1)$, в силу малости затухания на низких частотах, распространяются на большие расстояния. Этот принцип находится в основе построения всех параметрических профилографов. Низкочастотный сигнал получается в результате нелинейного взаимодействия двух высокочастотных сигналов (первичные частоты $\approx 94 - 110$ кГц), излучаемых параметрической антенной. Вторичные настраиваемые

низкие частоты (5, 6, 8, 10, 12, 15 кГц) используются для профилирования морского дна, а высокая частота – для съемки рельефа, что может быть использовано для контроля качества площадной съемки рельефа с помощью МЛЭ.

В настоящее время мелководные параметрические профилографы серийно выпускают фирмы «Инномар» (Германия) – «SES-2000Standard» и «Конгсберг» (Норвегия) «TOPAS PS 40» – (TOpographic PArametric Sonar). Для мелководных съемок в Арктике такая аппаратура представляет несомненный интерес. Преимуществом параметрического профилографа являются малые габариты приемопередаточной гидроакустической антенны, которую не только можно «врезать» в корпус судна, но и смонтировать на штанге при забортном варианте установки. Так, параметрический профилограф «SES-2000 Standard» имеет массу трансдьюсера в воздухе 22 кг, при этом характеристика направленности (угол луча) составляет $2,0^\circ$, что обеспечивает возможность забортного варианта установки трансдьюсера совместно с антенной мелководного МЛЭ.

Параметрические источники имеют преимущество при генерировании низкочастотного луча, так как не создают ярко выраженных боковых лепестков, обеспечивая проникновение низкочастотного акустического сигнала в грунт до 50 м. Глубина проникновения сигнала в морской грунт зависит от типа грунта, формы импульса (в меньшей степени от глубины моря) и составляет от 2 до 50 м. При этом вертикальное разрешение по слоям может составлять 0,30 м и менее. Такая подробность стратификации донного осадка позволяет надежно опознавать верхнюю кровлю слоя вечной мерзлоты по результатам профилирования донных отложений, что является крайне актуальной задачей [3].

Продолжает совершенствоваться программное обеспечение параметрических профилографов по улучшению качества визуализации цветной профилограммы и повышению информативности. Так, на рис. 4 приведен пример визуализации газопроявления в толще дна на шельфе архипелага Шпицбергена, представленный на профилограмме параметрического эхолота-профилографа PS-40. На цветной профилограмме реального времени хорошо прослеживаются каналы выхода газа из толщи донных осадков, а также следы газопроявления на поверхности дна.

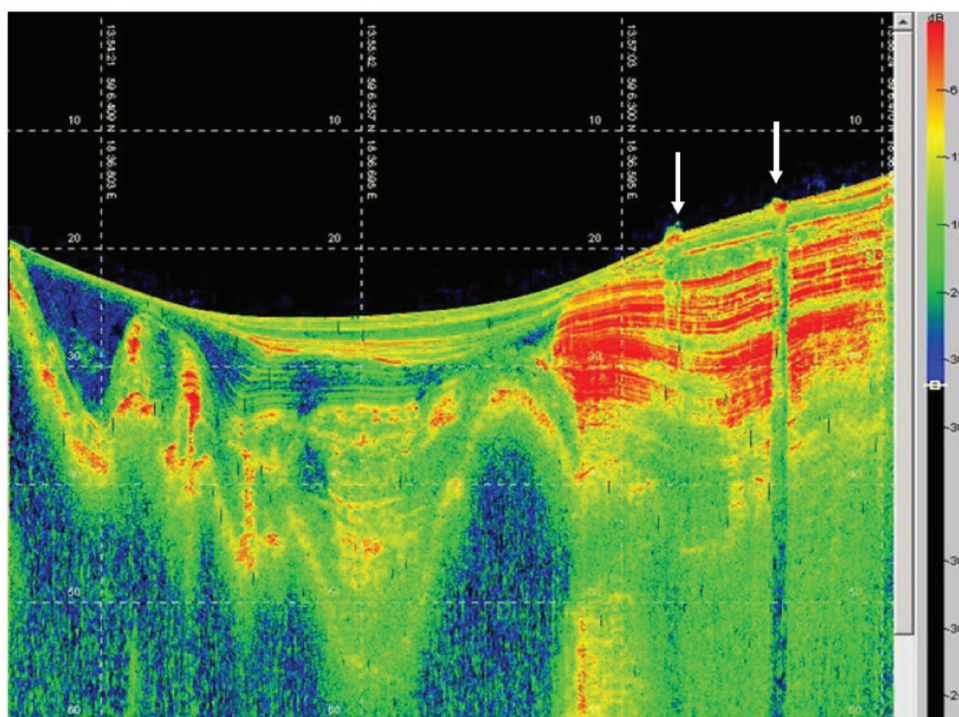


Рис. 4. Визуализация газопроявления в толще и на поверхности морского дна на шельфе архипелага Шпицбергена на профилограмме параметрического эхолота-профилографа PS-40 (Kongsberg)

Большие возможности для анализа структуры донных осадков предоставляют пакеты программ окончательной обработки данных низкочастотных эхолотов-профилографов. ЭП различных фирм, как правило, осуществляют регистрацию данных в своих фирменных форматах. Универсальным форматом, используемым для окончательной обработки данных ЭП, является формат SEG-Y. Известными пакетами программ окончательной обработки данных низкочастотных ЭП являются SonarWIZ5 (Chesapeake Technology) и Fledermause MidWater (QPS/IVS).

Для обработки данных параметрических ЭП серии «SES» фирма «Инномар» предлагает свой пакет программ «ISE». Все имеющиеся на рынке пакеты программ окончательной обработки данных низкочастотных ЭП имеют свои преимущества и ограничения. Выбор конкретного программного обеспечения во многом зависит от целей и задач, решаемых при съемке. Обсуждение особенностей и опций различных специализированных программных продуктов представляет практический интерес, но выходит за рамки данной статьи.

Другой актуальной задачей является наглядное представление результатов площадной съемки рельефа дна совместно с результатами донного профилирования. В настоящее время решением данного вопроса занимается несколько ведущих фирм – разработчиков гидрографического программного обеспечения: «CARIS», «QPS» [11], «IFREMER», «ELAK» [20]. «RESON». Создаваемые этими фирмами программные пакеты, построенные на основе трехмерной визуализации (3D), позволяют использовать данные в различных форматах для создания итогового синтезированного пространственного изображения. Комплексное представление результатов площадной съемки и профилограммы ЭП в пакете программ трехмерной визуализации приведено на рис. 5.

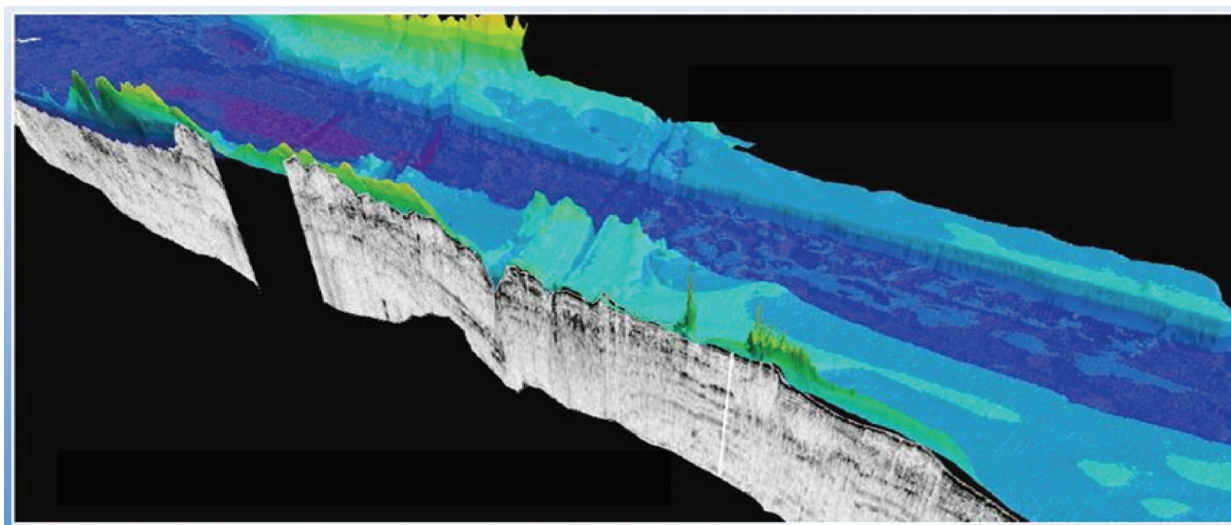


Рис. 5. Комплексное представление данных площадной съемки МЛЭ и данных эхолота-профилографа в пакете программ трехмерной визуализации

Современные гидрографические информационные технологии позволяют комплексировать различные источники гидроакустических данных для повышения информативности исследований и разрешающей способности до уровня распознавания в грунтовой толще положения кровли вечной мерзлоты, мест с вкраплением реликтовых ледовых линз, придонных скоплений газогидратов, а также газопроявлений в придонной водной толще.

Ввиду низкой стабильности подводного рельефа на отдельных акваториях арктических морей, следует включать в комплекс гидрографических работ наряду с многолучевой съемкой рельефа акустическое профилирование дна. Применение для этих целей параметрических профилографов не окажет влияние на производительность выполнения работ даже в варианте забортной установки акустических антенн, но обеспечит получение дополнительной информации, весьма ценной не только для инженерной гидрографии (например, мониторинг подводных трубопроводов), но и для морской геологии и геоэкологии Арктического шельфа.

Экспедиционные работы, направленные на дальнейшее изучение северных морей, являются финансово затратным предприятием. Поэтому необходимо принимать все возможные меры для того, чтобы обеспечить получение максимальных объемов гидроакустической информации о морском дне, которую можно в дальнейшем всесторонне проанализировать с использованием современного программного обеспечения с целью извлечения новых полезных сведений, необходимых для различных областей морской деятельности.

Выводы

1. Современная гидроакустическая аппаратура способна давать большой объем информации о морском дне. Задача заключается в том, чтобы в период экспедиционных работ обеспечить регистрацию максимального объема данных, способных после окончательной обработки дать новую комплексную информацию о состоянии и развитии морского дна.

2. До недавнего времени гидрографы, в первую очередь, интересовались съемкой рельефа дна с целью создания батиметрических моделей. Совершенствование гидроакустической аппаратуры, уменьшение весогабаритных характеристик акустических антенн, увеличение эффективности ЭГИС и связанное с этим повышение уровня автоматизации сбора данных позволяет по-новому организовать процесс морских работ, направленных на исследование морского дна.

3. При выполнении гидрографических работ в арктических морях России рекомендуется использовать гидроакустический комплекс в составе многолучевого эхолота и параметрического профилографа. Современный гидрограф может быть оператором одновременно многолучевого эхолота и низкочастотного эхолота-профилографа.

4. Одним из актуальных приложений всестороннего гидроакустического исследования дна является поиск и обнаружение субмаринных газовых гидратов с целью получения информации об их распределении, а также текущем состоянии для прогноза их развития. Гидроакустическое выявление субмаринных газовых гидратов является первым этапом их последующего изучения с учетом перспективы потенциального использования как сырьевого ресурса.

5. Современные гидрографические информационные технологии, позволяющие обрабатывать и комплексировать информацию от различных гидроакустических средств, предоставляют также возможность визуализации результатов исследований морского дна в виде трехмерных изображений и обеспечивают их последующее хранение в базах данных геоинформационных систем.

Список литературы

1. Каминский В. Д. Минерально-сырьевые ресурсы арктической континентальной окраины России и перспективы их освоения / В. Д. Каминский, О. И. Супруненко, А. Н. Смирнов // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 3 (15). — С. 52–61.
2. Гинзбург Г. Д. Субмаринные газовые гидраты / Г. Д. Гинзбург, В. А. Соловьев. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. — 199 с.
3. Кожухов И. В. Северный регион Российской Федерации как зона экологического риска и новый технологический этап освоения Арктики / И. В. Кожухов, Ю. Г. Фирсов, Н. Ю. Гордиенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2013. — № 2 (72). — С. 73–78.
4. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2010. — С. 348.
5. Фирсов Ю. Г. Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.
6. Фирсов Ю. Г. Новый этап батиметрических исследований северных акваторий России на примере Карского моря / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов, Е. Н. Колосков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 115–124.

7. Второй сезон международной научной экспедиции «Миры» на Байкале [Электронный ресурс]. — Сайт Института Океанологии РАН. — Режим доступа: <http://www.ocean.ru/content/view/784/90/>.
8. *Borowski W. S.* A review of methane and gas hydrates in the dynamic, stratified system of the Blake Ridge region, offshore southeastern North America / W. S. Borowski // *Chemical Geology*. — 2004. — Vol. 205. — P. 311–346.
9. *John E. Hughes Clarke.* Applications of multibeam water column imaging for hydrographic survey / E. John // *The Hydrographic Journal*. — 2006. — P. 1–31.
10. *Gardner J. V.* Plume 1400 Meters High Discovered at the Seafloor off the Northern California Margin, EOS Transactions / J. V. Gardner [et al.] // *American Geophysical Union*. — 2009. — Vol. 90. — № 32. — P. 275–275.
11. *Lindsay Gee.* New Tools for Water Column Feature Detection, Extraction and Analysis / Gee Lindsay [et al.] // *Sea Technology*. — October 2014. — P. 27–30.
12. Detailed bathymetric mapping and side scan surveys in the investigation of cold fluid vent sites and associated gas hydrate occurrences / Jens Greinert, Wilhelm Weinrebe, Peter Gimpel, Jörg Brockhoff // *The Hydrographic Journal*. — 2002 — № 106, October. — P. 15–19.
13. *Keith A. Kvenvolden.* Potential effects of gas hydrate on human welfare / A. Keith // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. — 1999. — Vol. 96. — P. 3420–3426.
14. Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea / Lieven Naudts [et al.] // *Marine Geology* 251 (2008). — P. 253–267. Режим доступа: http://users.ugent.be/~jgreiner/papers/Naudts_etal_Marine_Geology_2008.pdf.
15. NOAA and partners demonstrate success of multibeam sonar to detect and map deep-sea gas seeps.— Режим доступа http://www.noaanews.noaa.gov/stories2011/20110915_oceanosexplorer.html.
16. *Paull C. K.* Herguera Seafloor geomorphic manifestations of gas venting and shallow subbottom gas hydrate occurrences / C. K. Paull [et al.] // *Geosphere*. — 2015. — 11 (2). — P. 491–513.
17. *Paull C.* Realizing the Energy Potential of Methane Hydrate for the United States / C. Paull [et al.]. — Режим доступа: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12831.
18. *Reag M.* Large-scale simulation of methane hydrate dissociation along the West Spitsbergen Margin / M. Reag, G. Moridis // *Geophysical research letters*. — 2009. — Vol. 36. — L23612.
19. *Schneider J von Deimling.* Technical Note: Detection of gas bubble leakage via correlation of water column multibeam images Ocean Sci. / J. Schneider von Deimling [et al.]. — Режим доступа: <http://www.ocean-sci.net/8/175/2012>.
20. *Schneider von Deimling.* Flare imaging with multibeam systems / J. Schneider von Deimling, [et al.] // *Data processing for bubble detection at seeps Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2007 — Vol. 8. — Num. 6. — 6 June.
21. *Shakhova.* Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf / Shakhova [et al.] // *Science*. — 2010. — № 237. — P. 1246–1250.
22. *Shakhova.* The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle / Shakhova // *Geophysical research letters*. — 2005. — Vol. 32. — L09601.
23. *Westbrook G.* Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin / G. Westbrook [et al.] // *Geophysical research letters*. — 2009. — Vol. 36. — L15608.
24. *Weber T.* Acoustic estimates of methane gas flux from the seabed in a 6000 km² region in the Northern Gulf of Mexico / T. Weber, et al // *Geochem. Geophys. Geosyst.* — 2015. — 15. — P. 1911– 1925.

УДК 656.61.052:621.396.6:629.12.018(075.8)

В. В. Каретников,
д-р техн. наук, проф.;

Р. В. Волков,
асп.;

Г. В. Киселевич
асп.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГЛОНАСС/GPS НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПУТЕВЫХ РАБОТ

TO THE QUESTION OF USE RIVER DIFFERENTIAL SUBSYSTEM GLONASS / GPS ON THE INLAND RUSSIAN WATERWAYS AT CARRYING OUT OF TRACK WORKS

В статье рассматриваются основные принципы построения локальных дифференциальных подсистем ГЛОНАСС/GPS, работающих для нужд внутреннего водного транспорта Российской Федерации. Отмечено, что применение данной системы высокоточного позиционирования ГЛОНАСС/GPS и ее функциональных дополнений позволит осуществлять так называемый «инструментальный метод судовождения», который даст возможность значительно увеличить эффективность и безопасность плавания по внутренним водным путям. Показано, что использование локальных дифференциальных подсистем позволит качественно повысить сбор навигационно-гидрографической информации при производстве комплекса путевых работ, ежегодно выполняемых Администрациями бассейнов ВВП. Описано предназначение основных автоматизированных навигационных комплексов, применяемых при решении производственных задач на речном флоте. Обозначена проблема создания перспективных автоматизированных тральных комплексов, учитывающих специфику обслуживаемых водных путей.

In this article discusses the basic principles of local differential subsystems GLONASS / GPS, working for the needs of inland waterway transport of the Russian Federation. It is noted that the use of these high-precision positioning systems GLONASS / GPS and its functional additions will allow called instrumental method of navigation, which will greatly increase the efficiency and safety of navigation on inland waterways. It is shown that the use of local differential subsystems will qualitatively improve the collection of navigational and hydrographic information in the production of complex track works, performed annually Basin Administration of inland water ways. Described the main purpose of automated navigation systems, used for solving industrial problems on the river fleet. Also outlined the problem of creating a tral perspective automated complexes taking into account specificity serviced waterways.

Ключевые слова: внутренние водные пути, контрольно-корректирующая станция, локальные дифференциальные подсистемы, глобальные навигационные спутниковые системы ГЛОНАСС/GPS.

Key words: Inland waterways, control and correction stations, local differential subsystem, global navigation satellite system GLONASS / GPS.

В НАСТОЯЩЕЕ время на внутренних водных путях Российской Федерации (ВВП РФ) осуществляется подготовка к внедрению таких конструктивных информационных структур, как корпоративная речная информационная система, речная информационная система, автоматизированная система управления движением судов, определяющих эффективность мониторинга, управления и безопасности судоходства. Необходимым условием их эффективного функционирования, по-видимому, является наличие высокоточного радионавигационного поля, формируемого глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS и полем дифференциальной поправки. Последнее формируется сетью контрольно-корректирующих станций (ККС) средневолнового диапазона в полосе частот 283,5–325,0 кГц [1] – [10].

Достаточно широкое распространение на ВВП РФ получили локальные дифференциальные подсистемы (ЛДПС) спутниковой радионавигационной системы (СРНС) второго поколения ГЛОНАСС/GPS, способные формировать устойчивое сплошное радионавигационное поле ДП в радиусе до 500 км от ККС [3], [5] – [9]. ЛДПС в основном строятся на базе одной ККС, аппаратуры управления и контроля, а также средств передачи данных. Как правило, отдельные ЛДПС образуют вблизи акватории с целью обеспечения прибрежных территорий высокоточным радионавигационным полем (рис. 1) [1] – [10]. Внедрение ЛДПС для нужд речного флота позволит в значительной мере увеличить уровень безопасности судоходства по таким районам за счет повышения качества навигационно-временного обеспечения.

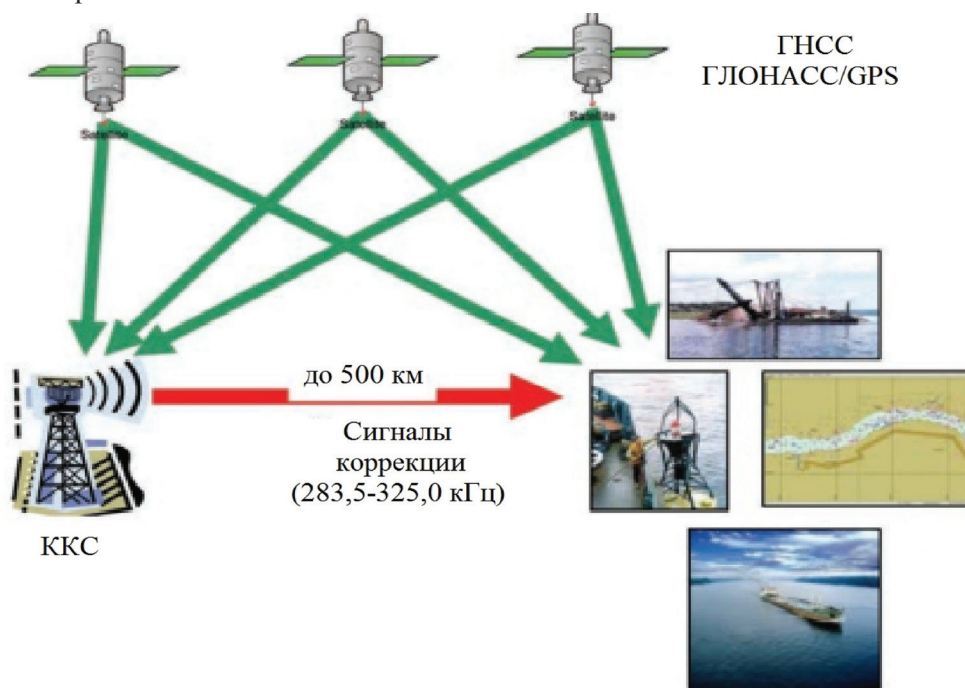


Рис. 1. Принципиальная схема речной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS

Точность местоопределения после ввода поправок определяется остаточными погрешностями, а также ошибками, обусловленными шумами и помехами, многолучевостью и воздействием тропосферы. Наиболее эффективным средством исключения ошибок является дифференциальный способ наблюдений, – DGPS (Differential GPS), суть которого состоит в выполнении измерений двумя приемниками: одним, установленным в определяемой точке, и другим, установленным в точке с известными координатами – базовой (контрольной) станции.

Дифференциальный режим СРНС основан на знании точного географического положения опорной станции дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS, координаты которой используются для расчета поправок к измеряемым псевдодальностям до всех спутников, находящихся в зоне радиовидимости ОС. Поправки в виде разностей измеряемых и расчетных значений псевдодальностей в составе дифференциальных сообщений, передаются потребителям в приемную аппаратуру СРНС, где измеренные величины псевдодальностей корректируются с их помощью.

Одной из особенностей режима DGPS является необходимость передачи дифференциальных поправок от базового приемника к определяемому. При этом различают два метода корректировки информации.

1. *Метод коррекции координат*, когда на станции и в определяемой точке наблюдают одни и те же искусственные спутники Земли, а затем в качестве дифференциальных поправок с базовой станции передают добавки к измеренным в определяемом пункте координатам. Недостатком этого метода является то, что приемники базового и определяемого пунктов должны работать по

одному рабочему созвездию. Это неудобно, поскольку все потребители, использующие дифференциальные поправки, должны работать по одним и тем же ИСЗ, что приводит к уменьшению фактора снижения точности.

2. *Метод коррекции навигационных параметров*, при использовании которого на базовой станции определяются поправки к измеряемым параметрам (например, псевдодальностям) для всех спутников, которые потенциально могут быть использованы потребителями. Эти поправки передаются на определяемые пункты, где уже непосредственно в GPS-приемнике вычисляются поправки к координатам.

Во многих странах мира уже действует развитая сеть DGPS-станций, постоянно транслирующих поправки на определенную территорию. Например, в прибрежной зоне Северной Америки это WAAS (Wide area augmentation system), Европы – EGNOS (European geostationary navigation overlay service), Японии – MSAS (Multi-functional satellite augmentation system), Австралии и Новой Зеландии развернуты сети радиомаяков для морской навигации.

Система EGNOS пока не имеет наземных станций в Российской Федерации, что означает невозможность ее применения на большей части этой территории, в том числе в авиации. Ещё одной проблемой является низкий угол возвышения спутников EGNOS над горизонтом. Тем не менее, в таких областях, как Ленинградская, Псковская, Новгородская, Смоленская, Мурманская, а также республика Карелия, практическая польза от использования EGNOS вполне возможна.

Следует отметить, что поправки, полученные с помощью дифференциального режима, в значительной степени зависят от расстояния между объектом и опорной станцией и наиболее эффективны, когда ошибки обусловлены внешними факторами. Для безопасной навигации по внутренним водным путям (ВВП) на территории РФ развернута наземная система дифференциальной коррекции, т.е. дополнительные информационные сообщения передаются через наземные радиостанции. Система функционирует за счет образования сети ККС (рис. 2).

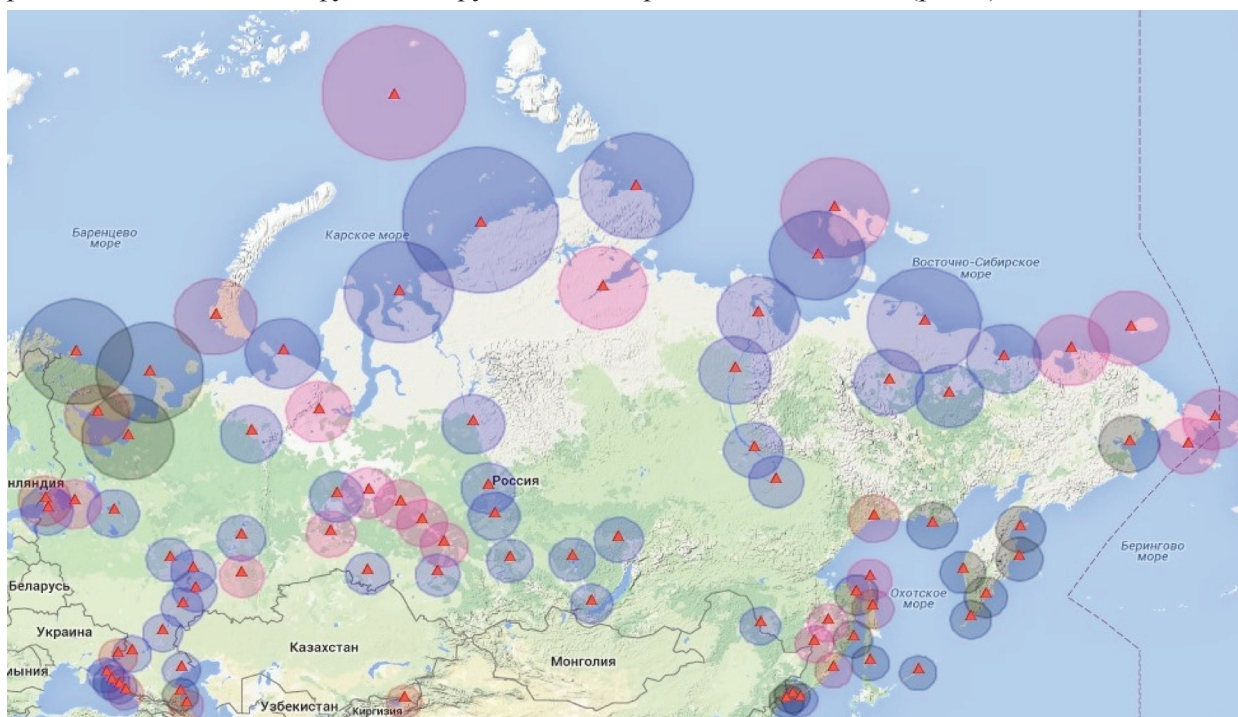


Рис. 2. Сеть контрольно-корректирующих станций на территории РФ

Исходя из представленной на рисунке схемы, можно отметить, что на данный момент основными районами покрытия дифференциального режима работы СРНС ГЛОНАСС/GPS в РФ являются:

- Арктический регион от Мурманска до Берингова пролива;
- восточная часть Финского залива и район порта Калининград;
- прибрежные воды Сахалина и Курильских островов;
- подходы к портам Владивосток, Находка и Восточный;
- подходы к портам Новороссийск, Таганрог и Керченскому проливу;
- подходы к устью Волги и порту Астрахань;
- подходы к порту Архангельск.

Для навигационного обеспечения судов речного флота дифференциальной подсистемой СРНС ГЛОНАСС/GPS покрыты участки ВВП РФ, для которых выполнены электронные навигационные карты (рис. 3). К таким районам относятся следующие:

- Волго-Балтийский бассейн;
- Волго-Донской бассейн;
- реки Обь, Иртыш, Енисей и Лена;
- река Амур.



Рис. 3. Покрытие внутренних водных путей РФ электронными навигационными картами

Для обеспечения надлежащего уровня безопасности плавания на ВВП РФ судоводителю необходимо непрерывно определять местоположение судна относительно оси судового хода, его кромок, берегов, а также отдельных опасностей. Данная задача может быть эффективно решена в случае совместного использования целого спектра навигационных систем, комплексов и приборов. Как свидетельствуют результаты натурных испытаний, в настоящее время с помощью дифференциальных дополнений глобальной навигационной спутниковой системы можно осуществлять практически непрерывные высокоточные местоопределения с дискретностью 1 – 5 с и точностью 1 – 5 м (95 %), что применительно к средней скорости движения судов на ВВП РФ составляет 15 км/ч [9], [10]. Естественно, наносить положение судна на навигационную карту с такой дискретностью в ручном режиме крайне сложно и неэффективно. Для решения данной задачи требуется использование электронных навигационных карт (ЭНК) и средств их отображения (система отображения электронных навигационных карт и информации (СОЭНК)). В таком случае будет использован так называемый *инструментальный метод судовождения*, основанный на применении современных технических средств и инфокоммуникационных технологий.

Использование локальных дифференциальных подсистем на ВВП РФ позволит вывести на новый уровень работы по содержанию водных путей, выполняемые Администрациями бассейнов ВВП с целью обеспечения безопасного плавания для судоводителей. Качественное обслуживание ВВП РФ зависит от использования современных автоматизированных производственных комплексов, предназначенных для сбора навигационно-гидрографической информации при производстве комплекса путевых работ. Процесс сбора навигационной информации приведен на рис. 4.

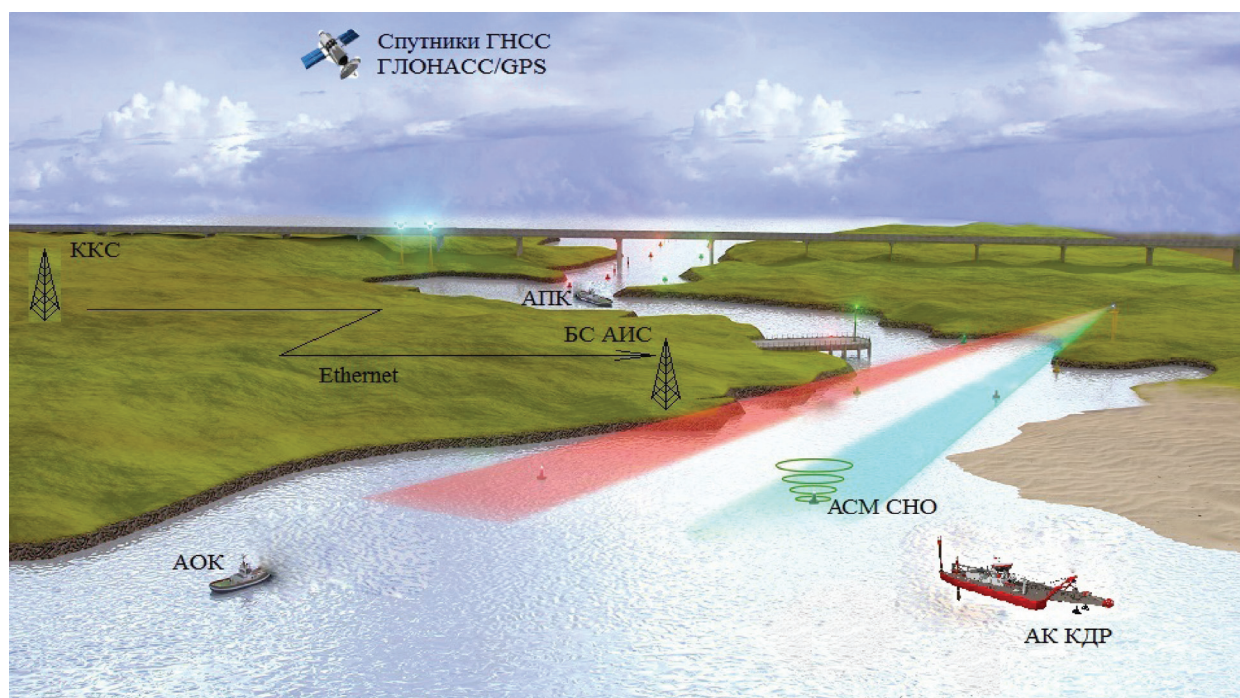


Рис. 4. Сбор навигационно-гидрографической информации на ВВП РФ

– автоматизированная система дистанционного мониторинга средств навигационного оборудования (АСМ СНО) – предназначена для контроля состояния средств навигационного оборудования;

– *автоматизированный обстановочный комплекс* – используется для сбора, обработки, хранения и передачи навигационной информации при производстве путевых работ, в том числе для

высокоточной расстановки и оперативного контроля состояния плавучих и береговых СНО, а также для контроля состояния фарватеров и судовых ходов;

– *автоматизированный комплекс контроля дноуглубительных работ* (АК КДР) – необходим для высокоточной постановки дноуглубительных снарядов на прорези при навигационно-гидрографическом обеспечении дноуглубительных работ.

Исходя из ранее изложенного, следует отметить, что для проведения полного комплекса путевых работ на ВВП РФ в автоматизированном режиме крайне необходимы разработка и внедрение перспективного автоматизированного трального комплекса, который позволит определять местоположения подводных препятствий и объектов, осуществлять технический осмотр судоходных гидротехнических сооружений, причальных стенок, а также передачу полученного результата в бассейновую базу данных ЭНК с целью обновления последней для поддержания ее на современном уровне [8].

Список литературы

1. Каретников В. В. Архитектура зон действия локальных дифференциальных подсистем, работающих для нужд внутреннего водного транспорта / В. В. Каретников. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 178 с.
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. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 526 с.
3. Каретников В. В. Моделирование топологической структуры зон действия контрольно-корректирующих станций дифференциальной системы ГЛОНАСС/GPS, установленных на реке Обь / В. В. Каретников, Ю. Н. Андриушечкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 86–89.
4. Каретников В. В. Перспективы комплексирования речных инфокоммуникационных технологий для повышения безопасности судоходства на ВВП / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 2 (67). — С. 49–53.
5. Каретников В. В. Топология зон действия локальных дифференциальных подсистем на внутренних водных путях России / В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2009. — № 4. — С. 64–67.
6. Каретников В. В. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — СПб.: Изд-во СПб.ГУВК, 2008. — 352 с.
7. Каретников В. В. Перспективы развития электронных навигационных карт внутренних водных путей Российской Федерации / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 1 (66). — С. 30–33.
8. Сикарев А. А. Особенности проведения путевых работ перспективными автоматизированными тральными комплексами на внутренних водных путях российской федерации / А. А. Сикарев, В. В. Каретников, И. Г. Кузнецов, Р. В. Волков // Морская радиоэлектроника. — 2013. — № 4. — С. 34–38.
9. Каретников В. В. Топология зон действия локальных дифференциальных подсистем на внутренних водных путях России / В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2009. — № 4. — С. 64–67.
10. Каретников В. В. Развитие и перспективы современных инфокоммуникационных систем для обеспечения судоходства на внутренних водных путях России / В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 4. — С. 74–77.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ЛИВНЕВЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ЖЕЛЕЗА

IMPROVING THE EFFICIENCY OF SEDIMENTATION RAINWATER TREATMENT OF IRON

В статье рассмотрена возможность использования седиментационных очистных сооружений для очистки ливневых сточных вод от взвешенных частиц железа в условиях стесненного осаждения. На основе результатов экспериментов, проведенных в лабораторных условиях, выполнена наладка седиментационных очистных сооружений ливневого стока, в результате чего увеличена эффективность очистки с 30 % до 90 %. Такая степень очистки позволяет рассматривать данный метод наравне с методами фильтрации и сорбции. Выявленный эффект стесненного осаждения, который наблюдается при концентрациях взвешенных веществ на входе в очистные сооружения выше 5 мг/л, опровергает известные формулы скорости осаждения частиц в среде. Экспериментально подтверждено, что для создания оптимальных условий седиментации при стеснённом осаждении необходимо увеличить расчетное время в два раза. Таким образом, результаты эксперимента по увеличению времени отстаивания позволяют сделать вывод о том, что возможно добиться высокой степени очистки от взвешенных частиц при регулировании скорости потока сточных вод в седиментационных очистных сооружениях.

The article considers the possibility of using the sedimentation of wastewater treatment facilities for treatment of rainwaters from suspended particles of iron in the constrained hindered settling. Based on the results of tests was carried out adjusting the sedimentation of storm water treatment facilities, in consequence of which increase the efficiency of sedimentation from 30% to 90%, conducted funnels the essence of which is to observe in laboratory conditions, the effect of precipitation depending on the parameters of liquid and sedimentation conditions. That allows considering this method for purity along with methods of filtration and adsorption. Identified the effect of restrained deposition observed at concentrations of suspended solids at the inlet of the treatment plant is above 5 mg/l, refutes the known formulas deposition velocity of particles in the environment. However, experimentally confirmed that the creation of optimal conditions for sedimentation-straitened deposition is necessary to increase the estimated time in half. Thus, the results of the experiment allow settling time increases say that it is possible to achieve a high degree of purification of suspended particles by adjusting the flow rate of sedimentation in wastewater treatment plants.

Ключевые слова: седиментация, стесненное осаждение, ливневые сточные воды, железо.

Key words: sedimentation, hindered settling, rain waste water, iron.

Введение

Методы фильтрации и сорбции являются наиболее распространенными вариантами очистки сточных вод от железа [1] – [3], так как они дают наилучший результат в удалении железа, если железо находится в нерастворимом состоянии или предварительно переведя его во взвешенное состояние [4], [5]. Но наряду с высокой эффективностью очистки эти методы наиболее ресурсоемкими, так как требуют постоянной замены или очистки фильтров либо сорбентов, которые в данном случае являются расходным материалом. Альтернативным методом, не требующим данных расходов, является метод седиментации, который чаще всего не принимается к рассмотрению при выборе метода очистки от железа из-за, обычно, невысокой степени очистки по сравнению с фильтрацией и сорбцией.

С помощью увеличения эффективности очистки седиментационных очистных сооружений можно сэкономить значительные суммы, требующиеся при эксплуатации очистных сооружений, работающих по принципу фильтрации или сорбции. Эти затраты сугубо индивидуальны для каждого случая и зависят от объема стоков, качества воды на входе и выходе из очист-

ных сооружений, уловленных загрязнителей, способа фильтрации или сорбции, типа фильтра или сорбента, влажности и класса опасности получаемого отхода, транспортного плеча к компании-переработчику данного отхода и стоимости его утилизации. Для приведенного случая эта сумма составила 31,5 млн руб./год. Такие эксплуатационные расходы являются одним из ключевых факторов поддержания работоспособности очистных сооружений. К сожалению, вопрос седиментационной очистки от железа не популярен у проектировщиков и разработчиков очистных сооружений. Сталкиваясь с сочетанием «очистка методом седиментации» и «железо», обычно рассматривают идеи очистки коагулированием посредством железа, в большинстве случаев, хлорного [6] – [8]. Поэтому одной из задач исследования является подтверждение возможности очистки сточных вод от железа методом седиментации путем увеличения степени очистки, проходящей в отстойнике. С этой целью при расчете эффективности очистки и установлении эффективного времени отстаивания важно учитывать основные принципы седиментации.

Основная часть

Рассмотрим движение шарообразной частицы в неподвижной среде (рис. 1). При движении частицы в жидкости возникают сопротивления, для преодоления которых, а также обеспечения равномерного движения должна быть затрачена определенная энергия. Величина возникающего сопротивления зависит от режима движения, формы обтекаемого тела и характера среды, в которой это тело движется.

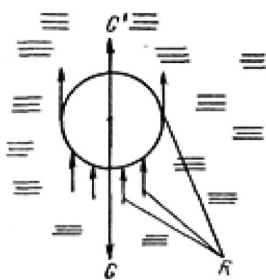


Рис. 1. Действие сил на твердую частицу, движущуюся в неподвижной среде

Если шарообразная частица весом G будет падать под действием собственного веса, то скорость ее первоначально возрастет, однако с ростом скорости начнет увеличиваться и сопротивление движению частицы со стороны среды. Одновременно произойдет уменьшение ее ускорения и через короткий промежуток времени наступит динамическое равновесие – сила тяжести станет равна силе сопротивления среды, и частица начнет двигаться с постоянной скоростью – *скоростью осаждения*. Баланс сил в этом случае составит

$$G - G' - R = 0, \quad (1)$$

где G – сила тяжести, равная весу частицы; G' – выталкивающая сила Архимеда, равная весу жидкости в объеме тела; R – сила сопротивления среды,

$$R = \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\omega_{oc}^2}{2}, \quad (2)$$

где d – диаметр частицы; ω_{oc} – скорость осаждения; ξ – коэффициент сопротивления среды (безразмерный).

Формула (2) справедлива, если осаждение не стесненное (свободное), когда соседние частицы не оказывают влияния на движение друг друга. Свободное осаждение наблюдается в разбавленных суспензиях и газовых взвешах (объемная концентрация твердой фазы менее 5 %) при отсутствии взаимного влияния частиц дисперсной фазы. Если концентрация частиц большая (стесненное осаждение), то осаждаясь, частицы соприкасаются друг с другом и сопротивление осаждению становится больше, чем для одиночной частицы. Вследствие этого скорость осаждения частиц уменьшается. При стесненном осаждении в рассчитанную скорость вводят поправки, зависящие от концентрации суспензии.

Наиболее изученными в области стесненного осаждения являются коллоиды. Несмотря на это формула стесненного осаждения весьма индивидуальна и для каждого случая проверяется на практике в лабораторных условиях. Поэтому принято при ориентировочных расчётах действительную скорость осаждения принимать равной половине теоретической одиночной шарообразной частицы. Таким образом, если концентрация загрязняющих веществ на входе довольно большая, то рассчитав теоретическую скорость осаждения частиц, необходимо учесть фактор стесненного осаждения и увеличить время отстаивания вдвое, чтобы получить расчетный результат работы отстойника на практике.

Данный подход был использован для реконструкции и наладки ливневых очистных сооружений предприятия, находящегося в Ленинградской области. По данным лабораторных анализов, концентрация железа в сточных водах составила 14 – 25 мг/л, что соответствует ранее приведенным условиям стесненного осаждения. Такая высокая концентрация вызвана тем, что почвы на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области богаты железом [9] – [11], которое из-за негерметичности трубопроводов, вызванной подвижностью грунта, изношенностью водопроводных сетей и высоким уровнем грунтовых вод, попадает в сточные воды, в том числе ливневой канализации. На данном участке концентрация общего железа в грунтовых водах достигает 36 – 25 мг/л, при норме сброса в водный объект хозяйственно-бытового назначения 0,3 мг/л [12]. Высокая изначальная концентрация в стоках диктует степень очистки, равную 99 – 98 %, что при общепринятых методах очистки ливневых стоков является недостижимым.

В засушливую погоду на очистные сооружения подается только грунтовая вода. Это вызвано негерметичностью труб и их глубоким залеганием (ниже уровня грунтовых вод). Очистные сооружения представляют собой отстойник, разделенный на две части, каждая из которых является независимой сама по себе (общий объем 3100 м³). Ливневый (паводковый) расход составляет 12 м³/мин, при стандартном водотоке среднегодовой расход – 5 – 9 м³/мин. Согласно расчётам проектировщиков ранее описанного очистного оборудования, средний режим отстаивания, равный 4 ч, должен давать результат очистки в 40 %, что, фактически, не выполнялось, так как не был учтен эффект стесненного осаждения. Для вывода очистных сооружений в рабочий режим с эффективностью отстаивания, равной 92–96 %, было проведено исследование регулирования скорости потока подачи сточных вод, что обеспечило увеличение среднего времени отстаивания с 4 ч до 12 ч.

В теории осаждения взвешенных частиц существует пропорциональная закономерность, показывающая, что эффективность отстаивания снижается со временем [13], [14]. Тест с воронками, позволяющий установить, что увеличение времени седиментации дает возможность добиться осаждения большего количества загрязнителя, на практике позволяет определить эффективное время осаждения частиц. Воронки наполняются жидкостью, предварительно перемешанной в общем объеме до однородного состояния, в равном объеме из одного источника. Через каждые 2 ч (половина расчетного времени) с одной из воронок (по очереди, чтобы в каждой из них рабочий объем сохранялся одинаковым) отбиралась проба для определения эффективности отстаивания. Пробы, взятые через 2, 4, 6, 8 и 24 ч, показали, что эффективность очистки существенно увеличивается (до 8 ч отстаивания), после чего изменяется незначительно. Следовательно, эффективное время отстаивания принимается за 8 ч, и скорость подачи стока должна быть уменьшена вдвое по сравнению с расчетной.

В связи с тем, что производительность насосов канализационной станции не регулируется, было принято решение использовать одну секцию отстойника как усреднитель-накопитель, в конце которой предлагалось поставить погружной насос, подающий сток во вторую секцию отстойника (рис. 2).

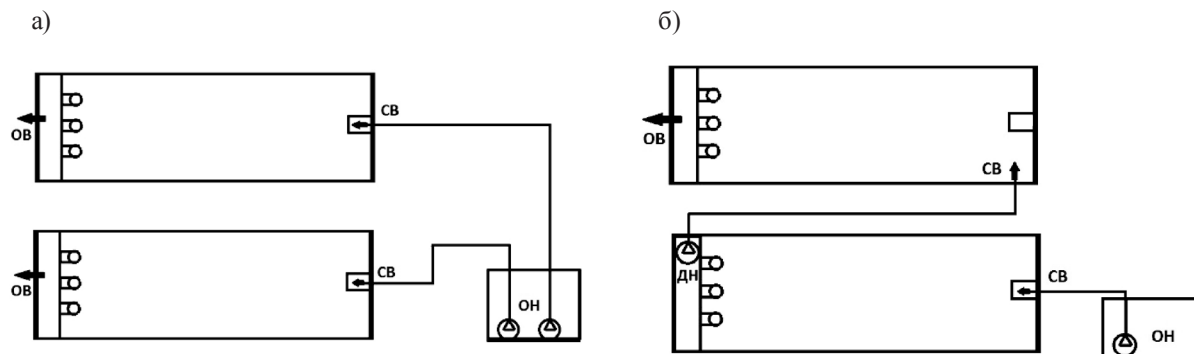


Рис. 2. Принципиальная схема очистных сооружений: а – до модернизации; б – после модернизации (СВ – сточная вода; ОВ – осветленная вода; ОН – основной насос; ДН – дополнительный насос)

Результаты внедрения нового режима работы отстойника, приведенные в таблице, проверялись мониторингом качества воды, проводимым раз в три-четыре дня на протяжении месяца при помощи экспресс-метода анализа железа с использованием фотоколориметра.

**Замеры концентрации железа на входе и выходе с очистных сооружений
в течение первого месяца эксперимента**

День замера, от начала эксперимента	Концентрация мг/л		Эффективность очистки, %
	На входе	На выходе	
1	9,61	0,82	91,47
4	6,24	0,54	91,35
8	4,92	0,36	92,68
11	8,43	0,78	90,75
15	15,35	1,12	92,70
18	13,88	0,98	92,94
22	14,16	1,08	92,37
25	6,89	0,28	95,94
29	9,27	0,54	94,17
Усредненные значения за период эксперимента			
–	9,86	0,72	92,71

В течение первого месяца эксперимента было очищено 25000 м³ воды. Учитывая среднюю концентрацию железа на входе и выходе из очистных сооружений, было выявлено 228 кг этого загрязнителя. Сточные воды на входе и выходе из очистных сооружений показаны на рис. 3.

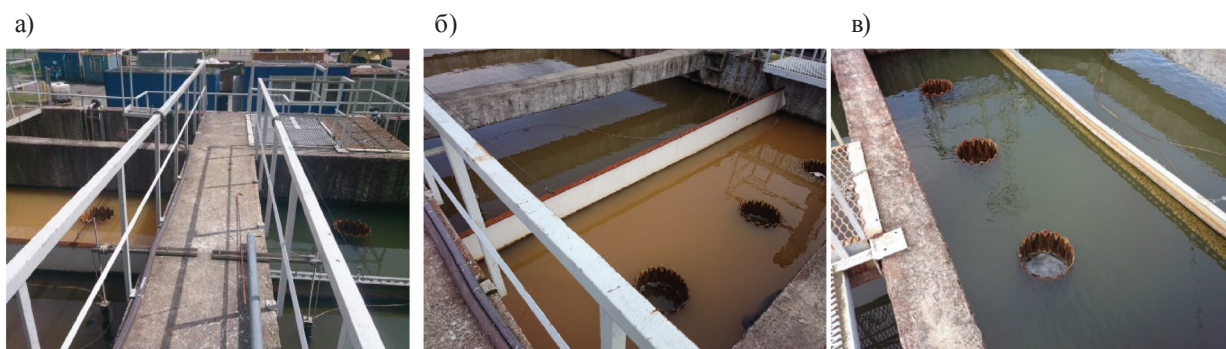


Рис. 3. Фотографии очистных сооружений, наглядно показывающие качество входной и выходной воды: а – слева конец первой емкости – место забора сточной воды, справа выход из очистных сооружений; б – исходная вода; в – очищенная вода

Выводы

1. В условиях стесненного осаждения важно учитывать, что общепринятые формулы определения скорости осаждения частиц не действуют, и при расчете фактического времени осаждения расчетные параметры должны быть удвоены.

2. Рабочие параметры седиментации должны быть предварительно рассчитаны с учетом всех поправок (например, стесненного осаждения) и апробированы в лабораторных условиях. Наиболее распространенным тестом определения оптимального времени отстаивания является тест с воронками, суть которого заключается в наблюдении в лабораторных условиях эффекта осаждения в зависимости от заданных параметров жидкости и условий отстаивания.

3. Седиментационные очистные сооружения позволяют добиться высокого качества очистки сточных вод от взвешенных частиц железа в условиях стесненного осаждения при соблюдении рабочего режима.

Список литературы

1. Лебедев И. А. Очистка железосодержащих вод фильтрованием через волокнистые материалы / И. А. Лебедев, Л. Ф. Комарова, Е. В. Кондратюк // Ползуновский вестник. Общая и прикладная химия. Экология. — 2004. — № 4. — С. 171–176.
2. Павлов Д. В. Универсальная система очистки промышленных сточных вод / Д. В. Павлов, В. А. Колесников // Водоочистка. — 2013. — № 1 — С. 12–16.
3. Кочеткова К. В. Физико-химические аспекты загрязнения и очистки поверхностных вод от тяжелых металлов и нефтепродуктов природными сорбентами / К. В. Кочеткова, Р. Р. Фаизов, И. Т. Гусева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2014. — № 4 (3). — С. 523–525.
4. Дурибе В. Ч. Удаление ионов железа из водных растворов окислительным методом / В. Ч. Дурибе, А. С. Крыжановский, Т. В. Бухаркина, В. В. Скудин // Успехи в химии и химической технологии. — 2011. — № 5 (121). — С. 58–63.
5. Гайдукова А. М. Способы интенсификации окислительно-восстановительных реакций в процессах удаления ионов железа (II) из водных растворов / А. М. Гайдукова, В. А. Бродский, В. А. Колесников, Г. И. Канделаки // Гальванотехника и обработка поверхности. — 2013. — № 4. — С. 47–53.
6. Колесников В. А. Разработка технологических решений для очистки сточных вод от загрязнений органической природы / В. А. Колесников, В. А. Бродский, В. И. Ильин // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности. — 2013. — Т. 29. — С. 169.
7. Мусина У. Ш. Исследование степени осаждения взвесей с использованием нового неорганического коагулянта / У. Ш. Мусина // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. — 2014. — № 165. — С. 72–83.
8. Гризодуб Н. Н. Сравнительная оценка и оптимизация методик выбора реагентов для очистки вод / Н. Н. Гризодуб, Е. В. Гурова // Науковедение: интернет-журнал. — 2012. — № 4 (13). — С. 1–5.
9. Зонн С. В. Железо в почвах / С. В. Зонн. — М.: Наука, 1982. — 208 с.
10. Бабак Н. А. Геоэкологические аспекты очистки сточных вод и почв от ионов тяжелых металлов / Н. А. Бабак, О. А. Капустина, Л. В. Митрофанова // Естественные и сельскохозяйственные науки. — 2014. — С. 108.
11. Королева Ю. В. Новые данные о биоконцентрировании тяжелых металлов на территории Балтийского региона / Ю. В. Королева, И. А. Пухлова // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. — 2012. — № 1. — С. 99–106.
12. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. — М.: Минздрав России, 2003. — 111 с.
13. Бабенко А. П. Гидравлическая крупность – основная характеристика при расчете отстойников Hydraulic size, as the main characteristic in calculating sump / А. П. Бабенко, И. В. Стрелец // Construction of Unique Buildings and Structures Internet Journal. — 2013. — № 6. — С. 11.

14. Кочетов О. С. Расчет элементов очистных сооружений / О. С. Кочетов // Глобализация науки: проблемы и перспективы. — 2014. — № 10. — С. 23.
15. Бурдин В. Н. Физические основы технологии промывки золотосодержащих / В. Н. Бурдин, Н. В. Бурдин // Современные наукоемкие технологии. — 2009. — № 8. — С. 16–22.
16. Пономарёв В. Г. Основы моделирования сооружений механической очистки сточных вод / В. Г. Пономарёв // Вода и экология: проблемы и решения. — 2004. — № 3 (20). — С. 47–55.
17. Семенова И. В. Условия осаждения железа из воды / И. В. Семенова, А. В. Хорошилов // Энергосбережение и водоподготовка. — 2006. — № 5. — С. 7–10.

УДК 502.1/2:656

А. Е. Пластинин,
канд. техн. наук, доц.

ОЦЕНКА РАЗМЕРА ВРЕДА, ПРИЧИНЕННОГО ПОЧВЕ, ПРИ РАЗЛИВАХ НЕФТИ С СУДОВ

ASSESSMENT OF THE EXTENT OF HARM TO THE SOIL AT OIL SPILLS FROM VESSELS

Выполнена количественная оценка размера вреда от компонентов судна различного класса опасности. Предложен способ косвенного определения размера вреда при сносе судна на берег по его типовым характеристикам. Получены расчетные зависимости для оценки размера вреда береговой черте при разливах нефти на объектах водного транспорта и определен порядок их применения. Разработаны регрессионные уравнения зависимости размера вреда от компонентов судна различного класса опасности с характеристиками районов их расположения. Создана методика определения размера вреда от компонентов судна различного класса опасности и выполнена ее алгоритмизация. Полученные результаты исследований могут быть полезны при создании документов, разрабатываемых в рамках Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (планов локализации и ликвидации разливов нефти, деклараций промышленной безопасности) при эксплуатации и проектировании объектов транспортного комплекса, а также проведении тренажерной подготовки персонала.

The quantitative assessment of the extent of harm from components of the vessel of various class of danger is executed. The way of indirect determination of the extent of harm at demolition of the vessel on the coast according to its standard characteristics is offered. Settlement dependences for an assessment of the extent of harm to coastal line at oil spills on objects of a water transport are received and the order of their application is developed. The regression equations of communication of the extent of harm from components of the vessel of various class of danger with characteristics of regions of their arrangement are developed. The technique of determination of the extent of harm from components of the vessel of various class of danger is created and its algorithmization is executed. The results of the researches can be useful at creation of the documents developed within the framework of the Uniform state system of the prevention and liquidation of emergencies (plans of localization and liquidation of oil spillages, declarations of industrial safety) during exploitation and designing of objects of the transport complex, and also during personnel training.

Ключевые слова: вред, почва, разлив нефти, способ оценки, компоненты судна, отходы, класс опасности, уравнения связи.

Key words: harm, soil, oil spills, assessment way, vessel components, waste, danger class, communication equations.



ОДНОЙ из важнейших задач, решаемых в рамках функциональных и территориальных подсистем Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), является определение размера вреда и, соответственно, уровня

управления при локализации и ликвидации разливов нефти (ЛРН), вызываемых действием источников как природного, так и техногенного характера [1, с. 74–77]; [2, с. 152–157].

Оценка размера вреда при ЛРН необходима при разработке следующих документов, создаваемых в рамках РСЧС: планов ЛРН всех уровней, планов ликвидации аварийных ситуаций, деклараций промышленной безопасности, паспортов безопасности опасных промышленных объектов, типовых паспортов безопасности территорий субъектов РФ и муниципальных образований и др. Следует отметить, что процедура оценки размера вреда при ЛРН осложняется действием следующего ряда факторов: большое разнообразие ситуаций, при которых возникает разлив нефти (РН); значительное количество составляющих размера вреда; обширная география местоположения возможных источников чрезвычайных ситуаций, связанных с РН (ЧС(Н)); множество методик для расчета вреда и отсутствие механизмов расчета, учитывающих специфику РН; разнообразие типов водных путей (поверхностных водотоков); учет эффективности мероприятий по ликвидации ЧС(Н) и др. [2, с. 152–157]; [3, с. 92–97]; [4, с. 168–174]; [5, с. 149–156]; [6, с. 129–135]; [7, с. 83–88]; [8, с. 130–135]; [9, с. 97–104]; [10, с. 53–61]; [11, с. 65–70]; [12, с. 127–134]. Поэтому существует необходимость разработки специального методологического обеспечения, которое будет предусматривать учет всех видов причинения вреда компонентам природной среды при планировании мероприятий по ликвидации последствий рассматриваемого вида ЧС.

Поскольку решение этого вопроса является достаточно сложной комплексной задачей, наиболее целесообразно для создания методологического обеспечения при расчете размера вреда в случае ЛРН использовать подход, в основе которого лежит разработка комплекса проблемно ориентированных методик, каждая из которых применима к отдельным компонентам природной среды.

Данная работа посвящена оценке размера вреда, причиняемого береговой черте при ЛРН с объектов водного транспорта. Основными источниками причинения вреда при ЧС(Н) на судах являются:

- нефть (груз, топливо и нефтесодержащая вода (НВ));
- грузы, не являющиеся нефтепродуктами (при авариях неналивных судов);
- хозяйственно-бытовые сточные воды (СВ);
- мусор;
- корпус, надстройка и механизмы судна как отходы производства и потребления при его выбросе (сносе) на берег в результате ЧС.

Оценка размера вреда в случае реализации рассматриваемого вида воздействия выполняется в соответствии с [13]. При этом искомую величину целесообразно представить как сумму размеров вреда собственно от РН и от сопряженных с ЧС(Н) источников причинения вреда (груз, СВ, мусор, и собственно судно при его выбросе (сносе) на берег в результате ЧС). Соответственно выражение для оценки размера вреда, причиняемого береговой черте, можно записать в следующем виде:

$$V_6 = V_{\text{РН}} + V_{\text{сопр}}, \quad (1)$$

где V_6 – суммарный размер вреда, причиненный береговой черте при ЧС(Н), тыс. руб.; $V_{\text{РН}}$ – размер вреда, причиненный береговой черте собственно от разлива нефти, тыс. руб.; $V_{\text{сопр}}$ – размер вреда, причиненный береговой черте от сопряженных с ЧС(Н) источников негативного воздействия, тыс. руб.

При ликвидации последствий РН объем механически снимаемого слоя почвы должен размещаться в специально оборудованных местах для хранения нефтесодержащих отходов. Однако, поскольку РН имеют случайный характер, предусмотреть заранее такие места практически невозможно, что приводит к образованию несанкционированных свалок и загрязненной нефтепродуктами земли. Поэтому необходимо разложить $V_{\text{РН}}$, тыс. руб., на два компонента:

$$V_{\text{РН}} = V_{\text{загр}} + V_{\text{отх}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{загр}}$ – размер вреда при химическом загрязнении почв, тыс. руб.; $V_{\text{отх}}$ – размер вреда в результате несанкционированного размещения отходов производства и потребления, тыс. руб.

Основными ущербобразующими, т.е. формирующими вред факторами, являются: параметры загрязнения (масса, глубина, класс опасности); категории земель и целевого назначения, на которую выброшено судно; таксы [13].

Определение размера вреда при химическом загрязнении почв $V_{\text{загр}}$, тыс. руб., выполняется по формуле [13]:

$$V_{\text{загр}} = CXB \cdot S \cdot K_r \cdot K_{\text{исх}} \cdot T_x, \quad (3)$$

где CXB – степень химического загрязнения; S – площадь загрязненного участка, м^2 .

$$S_i = L_{3(i)} \cdot B_{3(i)}, \quad (4)$$

где $L_{3(i)}$ – длина участка береговой черты, загрязненного нефтепродуктами, м; $B_{3(i)}$ – ширина участка береговой черты, загрязненного нефтепродуктами, м; K_r – показатель глубины химического загрязнения или порчи почв; $K_{\text{исх}}$ – исходный показатель категории земель и целевого назначения; T_x – такса, установленная при химическом загрязнении почв, тыс. руб./ м^2 , определяемая в зависимости от почвенно-климатической зоны [13]. Например, для Волжского бассейна T_x находится в диапазоне от 400 до 600 руб./ м^2 (среднетаежная, южнотаежная, лесостепная, степная, сухостепная и полупустынная зона).

Оценка размера вреда при несанкционированном размещении отходов производства и потребления (ОПП) $V_{\text{отх}}$, тыс. руб., выполняется по формуле

$$V_{\text{отх}} = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot T_{\text{отх}}) \cdot K_{\text{исх}}, \quad (5)$$

где M_i – масса отходов с одинаковым классом опасности, т; n – количество видов отходов, сгруппированных по классам опасности; $T_{\text{отх}}$ – установленная такса при деградации почв при несанкционированном размещении и ОПП, тыс. руб./т.

Масса отходов с одинаковым классом опасности M_i , т, определяется по следующей формуле:

$$M_i = M_{\text{нг}} + M_{\text{нп}} + M_{\text{т}}, \quad (6)$$

где $M_{\text{нг}}$ – масса удаленного нефтесодержащего грунта береговой черты, т,

$$M_{\text{нп}} = S_i \cdot h_r \cdot \rho_{\text{но}}, \quad (7)$$

где S_i – площадь загрязненного участка, м^2 ; h_r – глубина снимаемого слоя, м; $\rho_{\text{но}}$ – плотность почвогрунтов, $\text{т}/\text{м}^3$; $M_{\text{нп}}$ – масса нефтепродуктов, осевших в береговой черте в виде пленки; при прогнозировании принимается по данным математического моделирования (масса нефти на берегу), при ликвидации последствий – по данным обследования зоны ЧС, т; $M_{\text{т}}$ – масса нефтепродуктов, оставшихся в грузовых танках, топливных и масляных цистернах, а также в сборной цистерне НВ, т.

Размер причинения вреда береговой черте от сопряженных с ЧС(Н) источников $V_{\text{сопр}}$, тыс. руб., целесообразно представить в следующем виде:

$$V_{\text{сопр}} = V'_r + V'_{\text{св}} + V'_m + V'_c, \quad (8)$$

где V'_r – размер причинения вреда в результате несанкционированного размещения отходов производства и потребления (ОПП) в виде грузов, не являющихся нефтепродуктами, тыс. руб.;

$V'_{\text{св}}$ – размер вреда в результате несанкционированного размещения ОПП в виде СВ, тыс. руб.;

V'_m – размер вреда в результате несанкционированного размещения ОПП в виде емкостей с судовым мусором, тыс. руб.;

V'_c – размер вреда в результате несанкционированного размещения ОПП в виде корпуса, надстройки и механизмов судна при его выбросе (сносе) на берег в результате ЧС(Н), тыс. руб.

Оценки V'_r , $V'_{\text{св}}$, V'_m , V'_c могут быть получены по формуле (5).

В соответствии с федеральным Классификационным каталогом отходов перевозимые грузы, судостроительные материалы в составе корпуса и надстройки, судовых систем и механизмов относятся преимущественно к 3- – 5-му классу опасности, СВ и судовый мусор – к 4-му классу опасности. Таким образом, выражение для оценки размера причинения вреда в результате несанкционированного размещения ОПП в виде корпуса, надстройки и механизмов судна Y_c , тыс. руб., при его выбросе (сносе) на берег вследствие ЧС(Н) целесообразно представить в следующем виде:

$$Y'_c = Y_{c(3кл)} + Y_{c(4кл)} + Y_{c(5кл)}, \quad (9)$$

где $Y_{c(3кл)}$ – размер вреда от компонентов судна 3-го класса опасности, тыс. руб.; $Y_{c(4кл)}$ – размер вреда от компонентов судна 4-го класса опасности, тыс. руб.; $Y_{c(5кл)}$ – размер вреда от компонентов судна 5-го класса опасности, тыс. руб.

Определение массы рассматриваемых компонентов производится в соответствии с проектной документацией на судно, в том числе в виде проектно-специфицированных норм расхода материалов (ПСРМ)), а также на основании документов классификационных обществ (грузы, НВ, СВ, мусор).

Следует отметить, что в настоящее время транспортные суда представлены более чем 600 проектами различных типов и классов Российского Речного Регистра (РРР) и Российского морского регистра судоходства (РМРС). В зависимости от вида флота судно может содержать от 50 (сухогрузные баржи) до 320 (танкеры) различных видов отходов, что создает принципиальные трудности в оценке размера вреда от этого типа сложных отходов [14], [15].

Обработка ПСРМ и группировка материалов по классам опасности требует значительных затрат времени и труда высококвалифицированных специалистов. По оценке, выполненной в [14], [15], трудоемкость этих работ для одного проекта судов составляет в среднем 418,6 нормо-часов, что исключает возможность оперативного категорирования ЧС и определения уровня реагирования и управления при ЛЧС – необходимого условия функционирования РСЧС.

Сложный компонентный состав судов и не менее большое число видов и типов судов определяют необходимость применения статистических методов при оценке размера вреда от компонентов судна различного класса опасности. Поэтому преодоление рассмотренных трудностей возможно путем разработки специальной регрессионной модели для оценки размера вреда при сносе судна на берег, основанной на исследовании статистической зависимости степени экологической опасности компонентов судна-отхода или судоотхода (размера вреда) от его характеристик (модулей), которую можно получить в результате обработки статистических материалов достаточного представительного объема по типам и классам судов, построенным по отечественным проектам в некотором временном диапазоне. В таком случае определение размеров вреда будет производиться через конструктивные характеристики объекта, т. е. путем косвенного измерения исследуемых величин на основе применения методов теории вероятностей и математической статистики.

В работах [14], [15] было показано, что на судне существует три района концентрации преобладающего количества отходов с одинаковым классом опасности: машинное отделение (3-й класс), надстройка (4-й класс) и корпус (5-й класс). Соответственно размер причинения вреда от компонентов одинакового класса опасности должен быть статистически связан с характеристиками выделенных районов судна.

Для построения регрессионной модели использовались статистические данные по массам компонентов различного класса опасности и характеристикам районов их сосредоточения путем обработки ПСРМ, содержащихся в 90 проектах судов, отобранных случайным образом из 600 проектов. При этом рассматривалось шесть видов флота: буксирные, несамоходные сухогрузные, самоходные сухогрузные, пассажирские, несамоходные наливные и самоходные наливные суда (по 15 проектов судов каждого вида). В табл. 1 – 3 представлен фрагмент созданной базы данных по компонентам различного класса опасности в составе судов и их характеристикам. Перечень рассмотренных характеристик районов судна составлен на основе модулей, разработанных в середине XX в. Н. К. Дормидонтовым в его работах по проектированию судов [16].

На основании данных табл. 1 – 3 выполнено обоснование формы связи между размером причинения вреда и характеристиками районов судна $Y_{с(3-5\text{ кл})}$, тыс. руб., целью которого являлось построение соответствующих уравнений регрессии:

$$Y_{с(3\text{ кл})} = 0,3366 S_{\text{МО}}^{1,1267}; \quad (10)$$

$$Y_{с(4\text{ кл})} = 1,5408 S_{\text{над}} + 25,71; \quad (11)$$

$$Y_{с(5\text{ кл})} = 4,0573 \text{ LBN}^{0,8117}, \quad (12)$$

где $S_{\text{МО}}$ – площадь машинного отделения, м^2 ; $S_{\text{над}}$ – площадь палуб надстройки, м^2 ; LBN – кубический модуль, м^3 .

Графики полученных уравнений связи приведены на рис. 1 – 3.

Таблица 1

База данных по компонентам 3-го класса опасности в составе судов (фрагмент)

Проект	Масса, т	Вред, тыс. руб.	Объем машинного отделения, м^3	Мощность главных двигателей, кВт	Площадь машинного отделения, м^2	Объем машинного отделения в степени 2/3, м^2
576Т	3,64	131,04	315	735	126	46
P42	2,92	105,12	215	331	86	36
866	2,86	102,96	210	404	84	35
P77	3,25	117	230	971	92	38
81180	3,69	132,84	330	882	132	48
14891	2,93	105,48	250	442	100	40
P96	0,4	14,4	70	110	28	17
911В	0,38	13,68	75	221	30	18
81350	0,73	26,28	140	220	56	27
305	2,6	93,6	510	588	204	64
785	1,6	57,6	290	588	116	44
P51	0,35	12,6	70	220	28	17

Таблица 2

База данных по компонентам 4-го класса опасности в составе судов (фрагмент)

Проект	Масса, т	Вред, тыс. руб.	Объем надстройки, м^3	Объем надстройки в степени 2/3, м^2	Площадь палуб надстройки, м^2
576Т	74,6	671,4	1000	100	400
P42	38,6	347,4	310	46	124
866	32	288	325	47	130
P77	62	558	1110	107	444
81180	50	450	540	66	216
14891	38	342	400	54	160
P96	5,3	47,7	100	22	40
911В	12	108	150	28	60
81350	8	72	200	34	80
305	170	1530	4475	272	1790
785	200	1800	3784	243	1514
P51	12,5	112,5	317	46	127

Таблица 3

База данных по компонентам 5-го класса опасности в составе судов (фрагмент)

Проект	Масса, т	Вред, тыс. руб.	LBH	$(LBH)^{2/3}$	L(B+H)
576T	717	5162,4	6689	355	1908
P42	280,7	2021,04	1597	137	744
866	220	1584	1369	123	719
P77	845	6084	1524	132	752
81180	738	5313,6	3486	230	1287
14891	452	3254,4	1825	149	885
P96	32,1	231,12	139	27	127
911B	93	669,6	326	47	230
81350	98	705,6	247	39	212
305	526	3787,2	2663	192	1037
785	495	3564	2298	174	969
P51	64	460,8	324	47	252

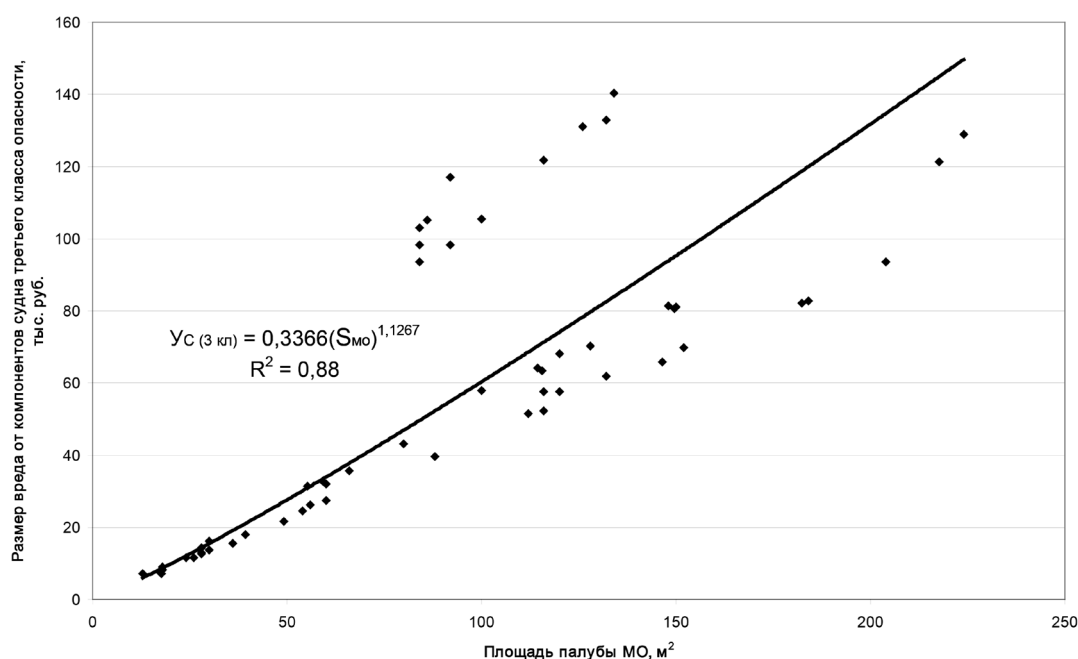


Рис. 1. Уравнение связи между размером вреда от компонентов судна 3-го класса опасности и площадью машинного отделения

Поскольку связь между размером вреда от компонентов судна определенного класса опасности и модулями районов судна прямая, консервативную оценку размера вреда $Y_{c(iкл)}^{ВДГ}$, тыс. руб., можно получить по значению, соответствующему верхней доверительной границе:

$$Y_{c(iкл)}^{ВДГ} = Y_{c(iкл)} + t \sqrt{D(Y_{c(iкл)})}, \quad (13)$$

где $Y_{c(iкл)}^{ВДГ}$ – значение размера вреда, соответствующее верхней доверительной границе; t – коэффициент доверия.

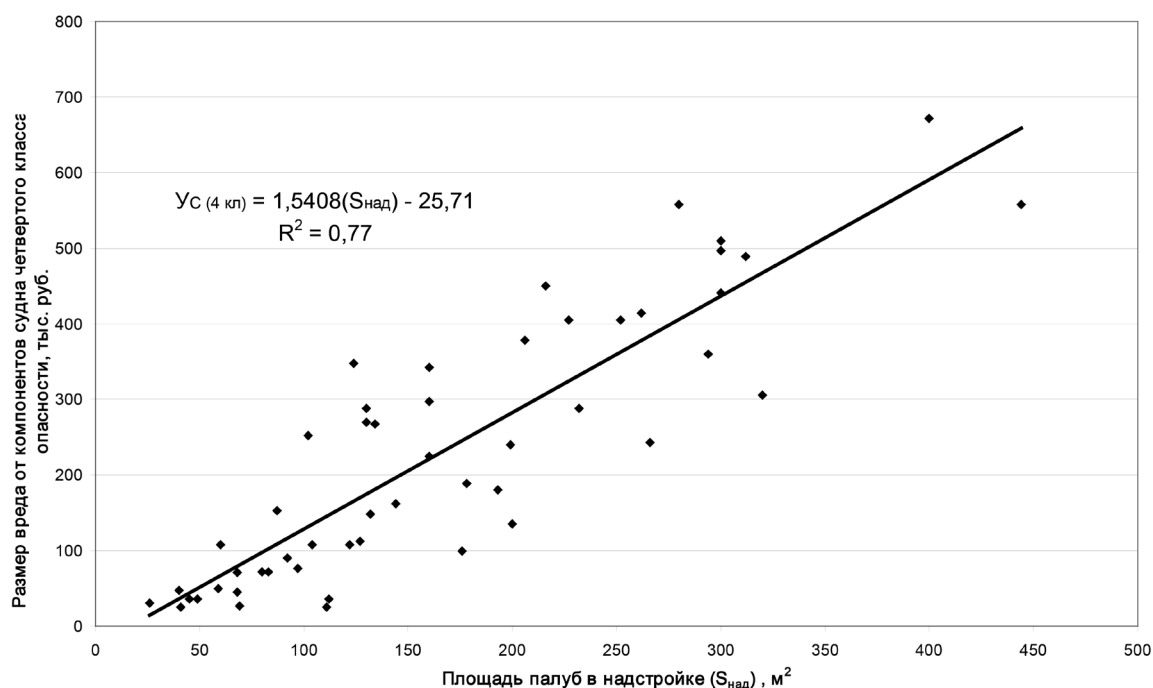


Рис. 2. Уравнение связи между размером вреда от компонентов судна 4-го класса опасности и площадью палуб в надстройке

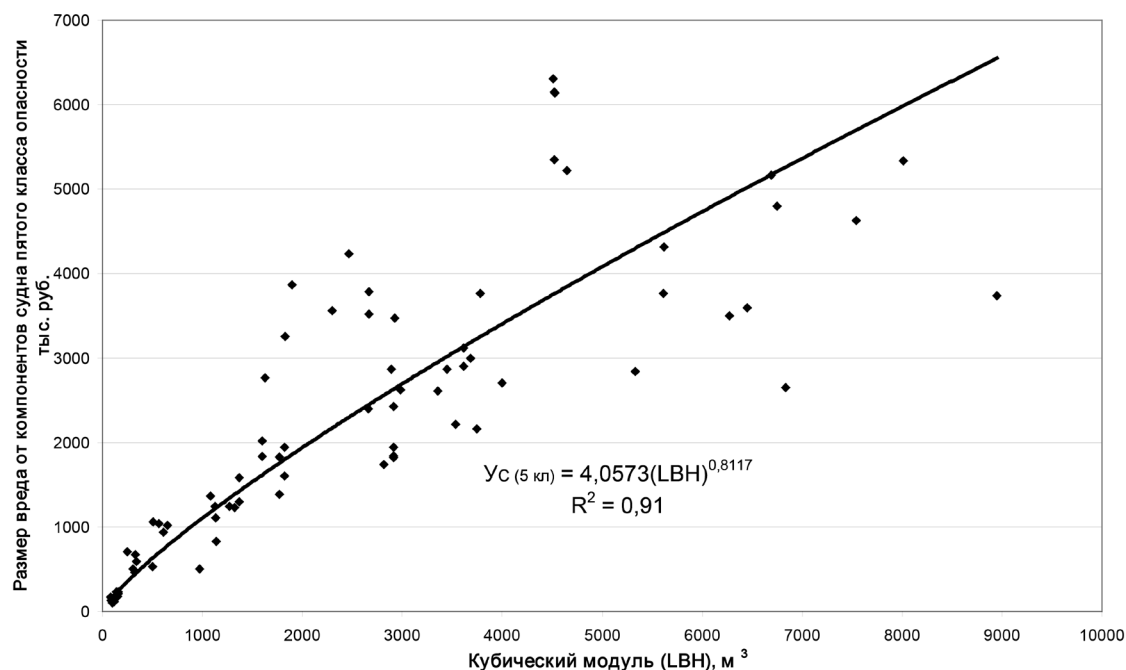


Рис. 3. Уравнение связи между размером вреда от компонентов судна 5-го класса опасности и кубическим модулем

Предложенный способ оценки размера вреда от компонентов судна различного класса опасности предполагает следующие этапы: определение характеристик районов судна; проверка выполнения условий применения регрессионной модели ($0 \text{ м}^2 \leq S_{мо} \leq 294 \text{ м}^2$; $0 \text{ м}^2 \leq S_{над} \leq 583 \text{ м}^2$; $0 \text{ м}^3 \leq LBH \leq 11910 \text{ м}^3$); расчет размера вреда; расчет оценки дисперсии размера вреда; расчет значения размера вреда, соответствующего верхней доверительной границе.

Технико-экономическая эффективность от внедрения определяется возможностью ускоренного получения количественной оценки размера вреда от компонентов судна различного класса, т. е. получением оперативных прогнозов размера вреда и категорирования ЧС(Н), являющихся необходимым условием функционирования подсистем РСЧС. Поэтому в качестве основного показателя технико-экономической эффективности от внедрения разработанного способа оценки размера вреда целесообразно использовать снижение трудоемкости работ.

В табл. 4 приведены результаты расчета трудоемкости по оценке размера вреда на примере буксирного судна проекта № Р96 по ПСНРМ (1-й вариант) и в соответствии с разработанной методикой по характеристикам районов судна, полученных путем натурного измерения (2-й вариант) и на основании документов классификационных обществ (3-й вариант), а также отношения полученных значений.

Таблица 4

Оценка трудоемкости

№ п/п.	Вариант оценки	Трудоемкость, нормо-ч
1	Обработка ПСНРМ (T_1)	418
2	По характеристикам районов судна, полученных путем натурного измерения (T_2)	9
3	По характеристикам районов судна, полученных на основании документов классификационных обществ (T_3)	2
4	Отношение T_1 / T_2	46,44
5	Отношение T_1 / T_3	209
6	Отношение T_2 / T_3	4,5

Наблюдаемое снижение трудоемкости (более чем в 200 раз) свидетельствуют о значительной технико-экономической эффективности от внедрения предлагаемого способа оценки размера вреда, причиненного почве от компонентов судна различного класса опасности при его сносе на берег в результате ЧС(Н).

Полученные результаты определяют приведенную последовательность оценки размеров вреда береговой черте при ЧС(Н).

1. Сбор исходных данных и формирование БД по характеристикам ЧС(Н) и ущербообразующим факторам (степень и глубина химического загрязнения; длина и ширина загрязненной части берега; количество нефти на берегу; категория земель и целевого назначения; вид и масса груза; объемы сборных емкостей (СВ, НВ и мусор); характеристики районов судна (площадь машинного отделения, площадь палуб в надстройке, кубический модуль); таксы).

2. Расчет площадей участков береговой черты, загрязненных нефтепродуктами.

3. Проверка наличия в зоне ЧС(Н) особо охраняемых территорий.

4. Оценка размера вреда при химическом загрязнении почв.

5. Оценка размера вреда в результате несанкционированного размещения отходов производства и потребления.

6. Оценка размера вреда, причиненного береговой черте собственно от РН.

7. Оценка размера вреда, причиненного береговой черте от сопряженных с ЧС(Н) источников причинения вреда.

8. Оценка суммарного размера вреда береговой черте при ЧС(Н).

Выводы

1. В результате выполненных исследований получены расчетные зависимости для оценки размера вреда береговой черте при ЧС(Н) на объектах водного транспорта и разработан порядок их применения.

2. Выполнена количественная оценка размера вреда от компонентов судна различного класса опасности.

3. Путем статистического анализа БД по компонентам различного класса опасности в составе судов показано, что для оценки размеров вреда от компонентов 3-го класса опасности целесообразно использовать характеристику района МО в виде его площади, для оценки размеров вреда от компонентов 4-го класса опасности – характеристику района надстройки в виде площади палуб надстройки, для оценки размеров вреда от компонентов пятого класса опасности – «кубический модуль» (произведение главных размерений).

4. Впервые получены регрессионные уравнения связи размера вреда от компонентов судна различного класса опасности с характеристиками районов их расположения. При этом коэффициенты детерминации $R^2 \geq 0,77$, что свидетельствует о наличии очень сильной связи между исследуемыми признаками.

5. Разработана методика определения размера вреда от компонентов судна различного класса опасности и выполнена ее алгоритмизация.

6. Впервые предложен и обоснован способ косвенного определения размера вреда при сносе судна на берег по его типовым характеристикам. Предлагаемый способ обеспечивает получение оперативных прогнозов размера причиненного вреда и категорирование ЧС(Н), что является необходимым условием для функционирования подсистем РСЧС. Наблюдаемое снижение трудоемкости (более чем в 200 раз) свидетельствует о значительной технико-экономической эффективности от внедрения предлагаемого способа оценки размера вреда.

7. Полученные результаты нашли применение при разработке и отработке более 100 планов ЛРН, в процессе подготовки более 200 спасателей и руководителей аварийно-спасательных формирований в составе персонала организаций водного транспорта на базе учебно-тренажерного центра по управлению кризисными ситуациями природного и техногенного характера Волжской государственной академии водного транспорта; при разработке мероприятий по обеспечению допустимого уровня риска негативного влияния судоходства на гидротехнические сооружения Нижегородской и Ростовской АЭС.

Список литературы

1. Наумов В. С. Информационные аспекты создания функциональной подсистемы организации работ по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на внутренних водных путях / В. С. Наумов, А. Е. Пластинин // Наука и техника транспорта. — 2007. — № 3. — С. 74–77.
2. Наумов В. С. Оценка ущерба при разливах нефти на объектах транспортного комплекса / В. С. Наумов, А. Е. Пластинин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 5 (1). — С. 152–157.
3. Наумов В. С. Организация контроля потенциально-опасных объектов судоходства / В. С. Наумов, А. Е. Пластинин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 8 (4). — С. 92–97.
4. Пластинин А. Е. Особенности оценки ущерба при разливах нефти на внутренних водных путях / А. Е. Пластинин, А. Н. Каленков // Приволжский научный журнал. — 2011. — № 3. — С. 168–174.
5. Наумов В. С. Проблема аварийных сбросов опасных грузов с судов / В. С. Наумов, А. Е. Пластинин, А. А. Парахина // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 11 (3). — С. 149–156.
6. Пластинин А. Е. Оценка загрязнения при разливе нефти на водную поверхность / А. Е. Пластинин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 18 (2). — С. 129–135.
7. Пластинин А. Е. Оценка риска возникновения транспортных происшествий / А. Е. Пластинин // Речной транспорт (XXI век). — 2013. — № 3. — С. 83–88.
8. Наумов В. С. Проблема защиты экологически чувствительных территорий при разливах нефти на внутренних водных путях / В. С. Наумов, А. Е. Пластинин, О. С. Нестерова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 130–135.

9. Пластинин А. Е. Оценка ожидаемого ущерба водным объектам при разливах нефти / А. Е. Пластинин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1. — С. 97–104.

10. Пластинин А. Е. Разработка матриц выбора средств борьбы с разливами нефти / А. Е. Пластинин // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 2. — С. 53–61.

11. Наумов В. С. Моделирование процессов ликвидации разливов нефти с судов / В. С. Наумов, А. Е. Пластинин // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 3. — С. 65–70.

12. Липатов И. В. Оценка гидродинамических условий при ликвидации разливов нефти / И. В. Липатов, А. Е. Пластинин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5. — С. 127–134.

13. Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды (утв. приказом МПР РФ от 8 июля 2010 года № 238) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902227668>, свободный. — Загл. с экрана. (дата обращения: 24.10.2014).

14. Пластинин А. Е. Оценка экологической опасности судов внутреннего плавания, подлежащих утилизации: Дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16. / А. Е. Пластинин. — Защищена 30.11.04; утв. 11.03.05. — Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2004. — 18 с.

15. Пластинин А. Е. Исследование распределения массы компонентов различного класса опасности по районам судна, подлежащего утилизации / А. Е. Пластинин // Вестник ВГАВТ. — 2006. — Вып. 18. — С. 142–145.

16. Дормидонтов Н. К. Проектирование судов внутреннего плавания / Н. К. Дормидонтов. — Л.: Судостроение, 1974. — 336 с.

УДК: 656; 004.8, 007.5 , 51-7, 510.67

Я. А. Селиверстов,
науч. сотр.;

С. А. Селиверстов,
науч. сотр.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВЫХ ВИДОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

ABOUT USING SIMULATION TO EVALUATE THE EFFICIENCY OF THE NEW TYPE OF THE URBAN PASSENGER TRANSPORT

Выполнено формальное построение модели распределения транспортных потоков с использованием графоаналитического и теоретико-множественного аппаратов. На практическом примере пояснен метод распределения транспортных потоков. Приведена разработка информационно-логической модели нового маршрута «Невской линии» внутригородского водного пассажирского транспорта. Выполнено моделирование и произведена оценка распределения транспортных потоков на улично-дорожной сети и внутренней сети метрополитена Санкт-Петербурга. Осуществлена оценка увеличения провозной способности «Невской линии» внутригородского водного пассажирского транспорта. Проанализированы результаты транспортного моделирования. Даны рекомендации по транспортному обслуживанию прилегающих к «Невской линии» районов. Обозначены практические ориентиры развития технологии транспортного моделирования.

The formal mathematical construction of the model distribution of traffic flows using graph theory and set-theory are developed. The method of distribution of traffic flows are explained with the practical example. The program model of the new route "Neva line" water transport are developed here. The evaluation of the distribution of traffic on the road network and the network of metro of St. Petersburg is performed with using the transport

modeling. The evaluation of increase carrying capacity of the “Neva line” water passenger transport is performed with using the transport modeling. The results of transport modeling are analyzed here. The recommendations for urban areas, adjoining to “Neva line” are given here. The ways of development of transport modeling are given here.

Ключевые слова: городская транспортная система, внутренний водный пассажирский транспорт, транспортное моделирование, методы распределения транспортных потоков, прогнозирование транспортных потоков, матрицы корреспонденций.

Key words: urban transportation system, water transport, transport modeling, methods of distribution of traffic flows, traffic forecasts, the matrix correspondence.

Введение

Рост современных мегаполисов, сопровождаемый усложнением процессов урбанизации, оказывает существенное влияние на изменение структурно-функциональных особенностей его транспортной системы (ТС) [1]. К последнему относится устойчивый рост мобильности городского населения и спроса на перевозки, увеличение плотности транспортных потоков (ТП) на транспортных сетях мегаполиса и совершенствование условий дорожного движения, развитие маршрутов общественного транспорта и изменение режимов его функционирования. При этом нерациональное управление городской ТС становится причиной таких серьезных проблем, как снижение безопасности дорожного движения, рост дорожно-транспортной аварийности, перегруженность транспортных коммуникаций, снижение общей пропускной способности транспортной сети, ухудшение экологической ситуации в городе и здоровья его населения. Поэтому обеспечение сбалансированного развития ТС мегаполиса в границах перспективной концепции устойчивого развития транспорта является сложнейшей научной задачей, требующей использования передовых методов транспортного планирования. К одним из наиболее эффективных способов принятия решений по оптимизации структуры и процессов функционирования транспортной системы страны, региона или города относится создание их транспортных моделей, которые позволяют отображать близкие к реальным закономерности транспортных процессов и, самое главное, оценивать последствия этих решений.

Следует отметить, что транспортная система Санкт-Петербурга представляет собой сложную организационно-техническую систему со сложно прогнозируемым поведением, что накладывает дополнительные ограничения на процесс управления ею и оценку результатов последнего.

В настоящее время в Соединенных Штатах Америки и странах Евросоюза подавляющее большинство транспортных проектов оцениваются с использованием методов имитационного моделирования. В России транспортное моделирование начали использовать с 2000 г. Среди последних работ российских исследователей в этой сфере необходимо отметить следующие позитивные сдвиги: в работе [2] выполнено построение структурной модели системы городского транспортно-логистического мониторинга и обозначены ее перспективы; в работе [3] представлены результаты решения оптимизационных задач линейного программирования (ЛП) для оценки и обоснования мер повышения эффективности ТС для г. Перми; в работе [4] построены математические модели формирования оптимального тарифа и выполнен расчет для г. Перми; в работе [5] рассмотрен подход классификации и упорядоченности транспортного поведения городского населения; в работе [6] вводится модель управления городской ТС, опирающаяся на целевые ориентиры пользователя и целевые ориентиры городской ТС; в работе [7] выполнена оценка эффективности ввода новых станций метрополитена методом транспортного моделирования.

Анализ предметной области свидетельствует о значительных успехах в развитии программных средств имитационного моделирования городских ТП. Однако формальное описание моделей распределения ТП и методы моделирования встречаются редко или остаются за рамками авторского изложения. Таким образом, задачи формализации модели и оценки эффективности внедре-

ния новых видов городского пассажирского транспорта с использованием технологии транспортного моделирования являются актуальными для рассматриваемой предметной области.

Настоящая работа, выполненная в 2011 г. при технической поддержке компании A+S и финансовой поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, была посвящена решению научной задачи – оценке распределения ТП в г. Санкт-Петербурге, обусловленных вводом нового маршрута внутригородского водного пассажирского транспорта (ВВПТ) и анализу его эффективности. Изложение данной научной задачи уместно начать с формального построения модели распределения ТП.

Основная часть

Необходимые данные для построения модели распределения ТП формируются в процессе анализа городской транспортной мобильности системой городского транспортно-логистического мониторинга [2]. Исходные данные модели включают (рис. 1): $Q_{\Sigma} = \rho_{\partial\alpha}$ $Q_{\Sigma} = \rho$ – общий поток между местом отправления ∂ и местом прибытия α ; $\rho_{\partial\alpha}$ – корреспонденция между местом отправления и местом прибытия; i – индекс места отправления; j – индекс места прибытия; $DStr = \{dstr_c\}$ – множество категорий мест отправления и мест прибытия (слои спроса); $SG = \{sg_{i(j)s}\}$ – множество групп населения (свойства структуры); $(\partial \rightarrow \alpha) = (\partial = s_1 \rightarrow d_1 \rightarrow \dots \rightarrow d_{end} = \alpha)$ – множество промежуточных районов между местом отправления и местом прибытия, $s_i \in S$, $d_j \in D$; $P_{sg_{i(j)s}}(dstr_c \cap sg_{i(j)s} \cap Q_{\Sigma})$ – доля группы населения $sg_{i(j)s}$, относящейся к категории $dstr_c$ по месту отправления-прибытия в общем потоке Q_{Σ} ; $R_{(\partial;\alpha)} = \bigcup_k r_k$ – множество транспортных маршрутов k между местом отправления ∂ и местом прибытия α ; $P_{sg_{i(j)s}}^{r_k}(dstr_c \cap sg_{i(j)s} \cap \rho_{\partial\alpha} \cap R_{(\partial;\alpha)})$ – доля группы населения $sg_{i(j)s}$, относящейся к категории $dstr_c$, пользующейся маршрутом r_k при движении из места отправления ∂ к месту прибытия α .

Требуется найти разбиение потока Q_{Σ} на составляющие его потоки $\bigcup_{sg_{i(j)s} \in SG} Q_{sg_{i(j)s}}$ по группам населения $sg_{i(j)s}$ (структура потока); распределение потока Q_{Σ} , структурированного по группам населения, по k транспортным маршрутам $\bigcup_k \bigcup_{sg_{i(j)s} \in SG} Q_{sg_{i(j)s}}^{r_k}$ от места отправления ∂ к месту прибытия α .

Разбиение потока Q_{Σ} на составляющие его потоки $\bigcup_{sg_{i(j)s} \in SG} Q_{sg_{i(j)s}}$ по группам населения $sg_{i(j)s}$ определяется следующим образом:

$$Q_{sg_{i(j)s}} = Q_{\Sigma} \cdot P_{sg_{i(j)s}} \quad (1)$$

Величина $Q_{sg_{i(j)s}}^{r_k}$ структурированного по группам населения $sg_{i(j)s}$ потока $Q_{sg_{i(j)s}}$ по маршруту k определяется в соответствии с выражением

$$Q_{sg_{i(j)s}}^{r_k} = Q_{sg_{i(j)s}} \cdot P_{sg_{i(j)s}}^{r_k}. \quad (2)$$

Предполагается также соблюдение условия баланса по прибытию и отправлению ТП:

$$\sum_{j=1}^n \rho_{i,j} = s_i; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \rho_{i,j} = d_j; \quad (4)$$

$$\rho_{i,j} \geq 0, i \in S, j \in D. \quad (5)$$

Для решения задачи перераспределения ТП используют функцию ограничений движения по времени [15], [16] вида

$$tm_{\ell} = \tau_{\ell}^0 \left[1 + a \left(\frac{fx_{\ell}}{cm_{\ell}} \right)^b \right], \quad (6)$$

где τ_{ℓ}^0 – время свободного движения по ℓ пути; $Q_{r_{\ell}}$ – ТП на ℓ пути; $cm_{\ell} > 0$ – пропускная способность ℓ -го пути; $tm_{\ell} > 0$ – время прохождения ТП по ℓ пути; a, b – калибровочные коэффициенты.

Рассмотрим практический пример, поясняющий модель распределения ТП. Будем считать для простоты расчета, что функция ограничений (6) учтена в параметрах $P_{sg_{i(j)s}}^{r_k}$.

На рис. 1 синей рамкой выделены исходные данные, красной – параметры модели, которые необходимо определить, и их процедура расчета, черной – граф-схема исследуемого процесса с нанесенными результатами расчета.

Исходные данные: $Q_{\Sigma} = \rho_{\alpha} = 100$ чел.; $DStr = WA = \text{Дом} - \text{Работа}$; $R_{(\alpha, \alpha)} = \bigcup_k r_k = 3$; $P_{ET} = 0,89$; $P_{TRS} = 0,11$; $P_{ET}^{r_1} = 0,8$; $P_{ET}^{r_3} = 0,2$; $P_{TRS}^{r_3} = 1$; $SG = ET$, $TRS = \text{Трудящиеся, Туристы}$.

Требуется найти:

- 1) разбиение потока Q_{Σ} на составляющие его потоки Q_{ET} и Q_{TRS} ;
- 2) распределение потока Q_{Σ} , структурированного по группам населения $sg_{i(j)s}$ по k транспортным маршрутам, т. е. $Q_{ET}^{r_1}$, $Q_{ET}^{r_3}$, $Q_{TRS}^{r_3}$.

Решение:

1) разбиение потока Q_{Σ} на составляющие его потоки найдем из выражения (1): $Q_{ET} = 100 \cdot 0,89 = 89$ и $Q_{TRS} = 100 \cdot 0,11 = 11$;

2) распределение потоков, структурированных по группам населения $sg_{i(j)s}$ по k транспортным маршрутам, найдем из выражения (2):

$$Q_{ET}^{r_1} = 89 \cdot 0,8 = 71; \quad Q_{ET}^{r_3} = 89 \cdot 0,2 = 18; \quad Q_{TRS}^{r_3} = 11 \cdot 1 = 11;$$

3) проверка на соблюдение баланса (3) – (5): $s_{\alpha} = 100 = d_{\alpha} = 100$.

Пояснив модель распределения ТП, перейдем к анализу реальной транспортной ситуации на уличной дорожной сети г. Санкт-Петербурга и сети метрополитена с вводом «Невской линии» ВВПТ.

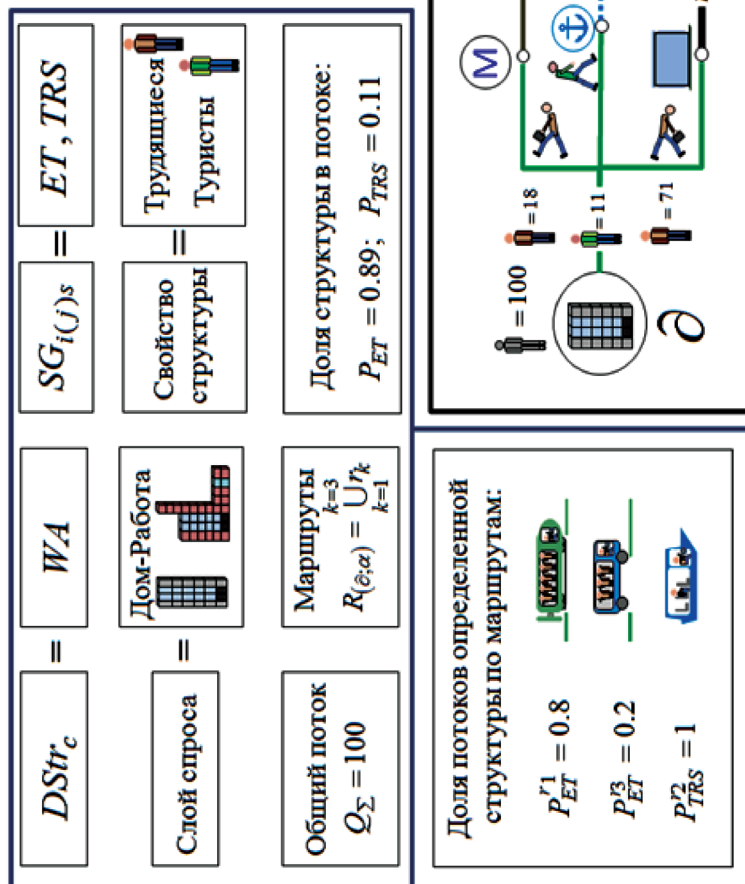
Сбор отсутствующих данных для разработки логической модели транспортного процесса и ее последующей калибровки проводился по двум направлениям: вначале собиралась и уточнялась информация о транспортной инфраструктуре районов, прилегающих к маршруту «Невская линия» ВВПТ, уточнялась характеристика транспортного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

Тип данных: объем пассажиропотока (пасс./сут), интервал движения общественного транспорта (мин), скорость транспортного потока (км/ч). Сбор статистических данных на маршруте «Невская линия» ВВПТ осуществлялся в течение восьми дней с 8.00 до 20.00 на остановочных пунктах:

- 1) Свердловская наб. (напротив дома № 4 по Большеохтинскому пр.), спуск № 1;
- 2) Синопская наб. (напротив дома № 2 по пл. Александра Невского), спуск № 2;
- 3) Обуховской Обороны пр. (напротив дома № 70);
- 4) Октябрьская наб. (напротив дома № 94, корп.1, лит. Л2);
- 5) Октябрьская наб. (напротив дома № 118);
- 6) Рыбацкий пр. (напротив дома № 2);
- 7) Рыбацкий пр. (напротив дома № 55).

Транспортное обеспечение маршрута: по маршруту «Невская линия» курсируют от пяти до двенадцати судов класса «Стрела» пассажироместимостью 12 чел.

Исходные данные модели



Разрешение модели

$Q_{sgl(j)s}^{rk} = Q_{sgl(j)s} \cdot P_{sgl(j)s}^{rk}$
$Q_{sgl(j)s} = Q_{\Sigma} \cdot P_{sgl(j)s}$

$Q_{ET} = 100 \cdot 0.89 = 89$	$Q_{TRS} = 100 \cdot 0.11 = 11$
--------------------------------	---------------------------------

$Q_{ET}^{r1} = 89 \cdot 0.8 = 71$	$Q_{TRS}^{r2} = 11 \cdot 1 = 11$
$Q_{ET}^{r3} = 89 \cdot 0.2 = 18$	

Рис. 1. Пример модели распределения транспортных потоков

В процессе регистрации статистических данных пассажирам был задан вопрос: Какова цель поездки по маршруту «Невская линия»? Предлагалось два варианта ответа: развлекательная / туристическая, обычная пассажирская. Также в течение 10 дней регистрировалась средняя скорость аквобуса на маршруте «Невская линия». В результате анализа было установлено, что средняя скорость на маршруте «Невская линия» составляет 55 км/ч.

Наибольший пассажиропоток на маршруте (рис. 2) приходится на выходные дни (суббота, воскресенье). Основной пассажиропоток формируется на начальном (175 чел.) и конечном остановочных пунктах (203 чел.). В течение рабочей недели пассажиропоток на маршруте резко снижается, о чем свидетельствуют статистические данные. Подавляющая часть пассажиропотока носит развлекательно-туристический характер (74 %), рядовые пассажирские перевозки не превышают 26 %. Участки уличной дорожной сети в районе Синопской наб., Малоохтинской наб. (Большеохтинский мост) и пр. Обуховской обороны (мост Александра Невского) находятся под постоянной нагрузкой в часы пик, так как связывают Центральный и Невский районы. Средняя скорость транспортного потока на этих участках составляет около 10 км/ч. Наиболее высокая плотность движения зарегистрирована на Малоохтинской и Синопской наб., Большеохтинском мосту, мосту Александра Невского, Сампсониевском пр., Краснодонской ул., Якорной ул., Новочеркасском пр., Невском пр., Заневском пр., пр. Обуховской Обороны, ул. Стахановцев и Тульской ул. Данные участки уличной дорожной сети расположены вблизи остановочных пунктов 3 и 4 (см. рис. 2).

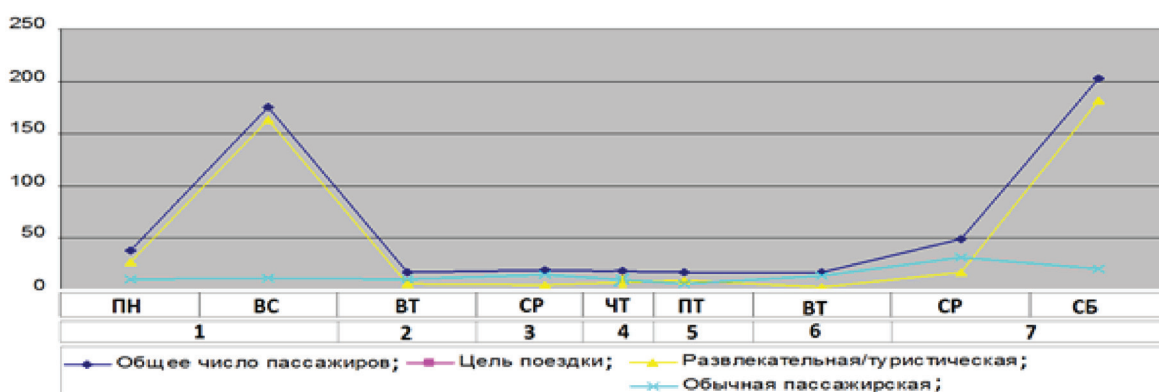


Рис. 2. Результаты опроса пассажиров относительно причины выбора маршрута

С отдалением от центра транспортная обстановка на уличной дорожной сети вблизи остановочных пунктов 5 и 6 улучшается. Скорость на Октябрьской наб., пр. Обуховской обороны и пр. Большевиков в районе ст. м. «Пролетарская» и Уткиной заводи в час пик превышает 40 км/ч. Вблизи остановочных пунктов 7 и 8 расположены следующие транспортные артерии: Рыбацкий пр., Шлиссельбургский пр., Караваяевская ул. и Прибрежная ул. Скорость транспортных потоков на них в час пик не превышает 25 км/ч. Маршрут «Невской линии» способен немного снизить нагрузку на прилегающую транспортную сеть, тем самым увеличив ее устойчивость к случайным отрицательным транспортным факторам. Разработка информационно-логической прогнозной модели «Невской линии» ВВПТ выполнялась с помощью программы PTV Vision® VISUM.

В настоящей работе рассмотрены две модели. Первая отражает плановую работу «Невской линии» ВВПТ, вторая – прогнозную ситуацию с ростом провозной способности «Невской линии» ВВПТ посредством замены судов класса «Стрела» на суда класса «Ингрия» и корректировки тарифов на перевозку пассажиров. Рассмотрим построение для транспортной модели № 1, поскольку транспортная модель № 2 строится аналогично.

На первом этапе выполняется районирование территорий г. Санкт-Петербурга. На втором этапе создаются примыкания между районами и транспортной сетью для транспортной модели № 1 (рис. 3). На третьем этапе строится схема маршрутной сети (рис. 4).

При разработке первой и второй модели в качестве исходной использовалась базовая модель городского общественного пассажирского транспорта г. Санкт-Петербурга, впоследствии дополненная маршрутами ВВПТ.

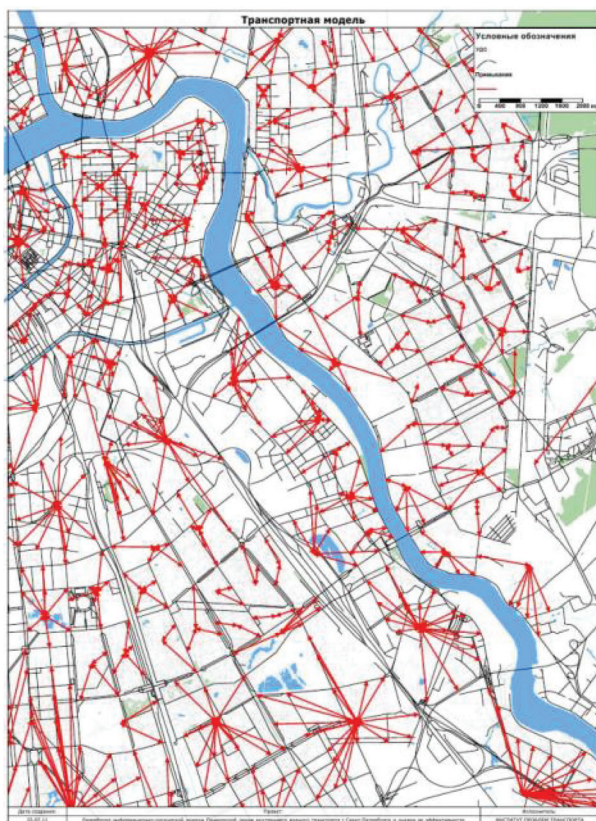


Рис. 3. Транспортные районы с примыканиями



Рис. 4. Схема маршрутной сети

Результаты моделирования, отражающие плановую работу «Невской линии» ВВПТ, рассматриваемую в транспортной модели № 1, приведены на рис. 5 а, а транспортной модели № 2 – на рис. 5 б. Ввод в эксплуатацию «Невской линии» вызовет незначительные количественные изменения в структуре пассажиропотоков на прилегающих к её маршруту станциях метрополитена.

Суточная величина отклонений пассажиропотоков на станциях метрополитена, прилегающих к маршруту «Невской линии» находится в интервале от 6 до 54 пасс./сут. Пассажиропоток на станциях «Рыбацкое», «Обухово», «Ломоносовская», «Елизаровская» снизится на величину порядка 30 чел./сут. Суточная величина отклонений пассажиропотока на *уличной дорожной сети Невского района* лежит в интервале 24 – 112 пасс./сут. Снижение пассажиропотока в ходе моделирования водного маршрута «Невская линия» зафиксировано на Свердловской наб. (78 чел./сут), Малоохтинском пр. (84 чел./сут), пр. Обуховской Обороны (112 чел./сут), Октябрьской наб. (83 чел./сут).

Увеличение провозной способности «Невской линии», посредством замены судов класса «Стрела» на суда класса «Ингрия» и корректировки тарифов на перевозку пассажиров окажет большее влияние на количественные изменения в структуре пассажиропотоков на прилегающих к маршруту «Невской линии» станциях метрополитена. Суточная величина отклонений пассажиропотоков на станциях метрополитена, прилегающих к маршруту «Невской линии», будет находиться в интервале 32 – 360 пасс./сут. Наиболее существенное снижение пассажиропотока составит на станциях «Рыбацкое» – 500 чел./сут, «Обухово» – 357 чел./сут, «Ломоносовская» – 249 чел./сут, «Елизаровская» – 137 чел./сут. Суточная величина отклонений пассажиропотоков на *уличной дорожной сети Невского района* будет лежать в интервале 142 – 512 пасс./сут. Снижение пассажиропотока зафиксировано на Свердловской наб. – 213 чел./сут, Малоохтинском пр. – 253 чел./сут, пр. Обуховской обороны – 203 чел./сут, Октябрьской наб. – 301 чел./сут.

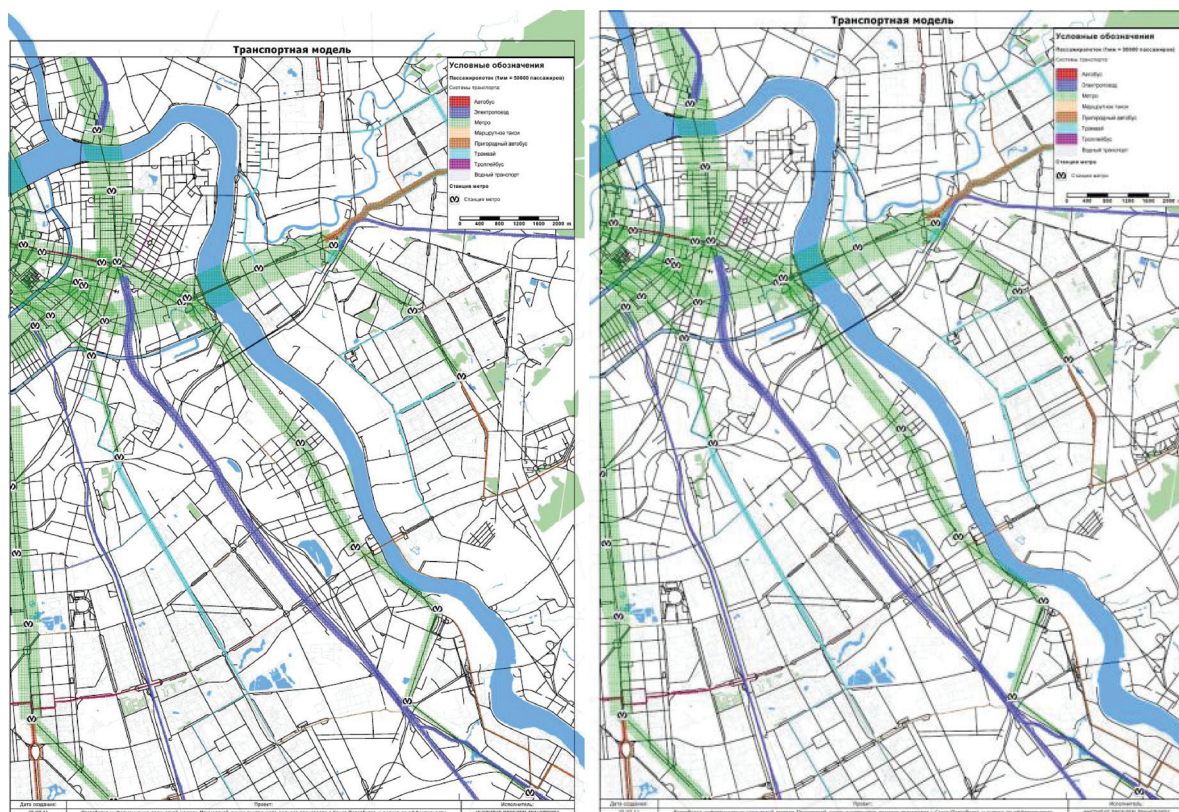


Рис. 5. Результаты расчета прогноза пассажиропотоков:
а – транспортная модель № 1; б – транспортная модель № 2

Выводы

На основании приведенных модельных расчетов можно сделать вывод о том, что ввод в эксплуатацию городского водного пассажирского маршрута «Невская линия», существенно не изменит транспортную ситуацию на уличной дорожной сети и станциях метрополитена, расположенных близ остановочных пунктов.

Руководствуясь проведенными исследованиями, также преждевременно ставить вопрос о целесообразности наращивания провозной способности «Невской линии» без корректировки тарифов и разработки мер, направленных на популяризацию водного транспорта с целью создания спроса со стороны пассажиров. Это станет возможным только при возведении новых жилых кварталов в Рыбацком и поселке Кудрово.

Исходя из ранее изложенного, предлагается позиционировать городской пассажирский маршрут «Невская линия» в качестве дополнительной транспортной коммуникации, обеспечивающей связь Невского района с Центральным районом города. Перечень мер, направленных на улучшение работы «Невской линии» ВВПТ, должен включать:

- строительство удобных пешеходных и автомобильных дорог к остановочным пунктам;
- обеспечение остановочных пунктов электронными табло, информирующими пассажиров о местонахождении и времени пребывания аквабусов;
- размещение вблизи остановочных пунктов водного маршрута остановок городского пассажирского наземного транспорта;
- модернизацию причальных сооружений с целью повышения скорости швартовки аквабусов и сокращения времени посадки-высадки пассажиров;
- включение ВВПТ в системы единых электронных билетов;
- проведение мер, направленных на популяризацию водного пассажирского транспорта у горожан.

Предлагается также рассмотреть возможность слияния маршрутов «Невской линии» и «Центральной линии» в «Центрально-Невскую линию» (рис. 6).



Рис. 6. Слияние маршрутов «Невской линии» и «Центральной линии»

Протяженность новой «Центрально-Невской линии» составит 25 км. Движение по новой водной транспортной артерии сократит время движения пассажиров на пересадку, а также позволит ликвидировать пересадочный узел в районе Свердловской набережной.

Центрально-Невский маршрут увеличит спрос со стороны пассажиров Центрального района, перемещающихся в Невский район и обратно. В случае дефицита провозной способности линии ее предлагается повысить посредством перехода на суда класса «Ингрия» большей вместимости. Безубыточность новой линии позволит сократить расходы бюджета Санкт-Петербурга на величину субсидий, предоставляемых перевозчикам в целях возмещения затрат или недополученных доходов в связи с осуществлением ими перевозок водным транспортом Санкт-Петербурга.

Рассмотренная модель распределения ТП согласуется с логико-алгоритмическими моделями систем управления городскими ТС [6], [8], логико-алгебраическими моделями систем управления логистикой [9], [10] и моделями пространственной организации городских транспортных систем [11]. Ее интеграция в программно-аппаратные системы управления городским транспортом [12] – [15], в соответствии с принципами [16], [17], позволит качественно повысить эффективность транспортного обслуживания [18], [19] за счет точности прогноза дорожно-транспортной обстановки [20], [21] на уличной дорожной сети города Санкт-Петербурга.

Список литературы

1. Белый О. В. Фундаментальные проблемы развития транспортного комплекса / О. В. Белый // Экономика качества. — 2013. — № 3. — С. 23–28.
2. Селиверстов Я. А. Особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов, А. Л. Стариченко // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2015. — № 1. — С. 29–36.

3. Якимов М. Р. Модель формирования эффективной транспортной системы крупного города / М. Р. Якимов, Ю. В. Трофименко // Вестник ПГТУ. Урбанистика. — 2011. — № 4. — С. 4–12.
4. Якимов М. Р. Методология расчета оптимального тарифа на перевозки городским пассажирским транспортом общего пользования / М. Р. Якимов // Вестник транспорта Поволжья. — 2014. — № 2 (44). — С. 86–91.
5. Селиверстов Я. А. О построении модели классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса [Электронный ресурс] / Я. А. Селиверстов // Интернет-журнал Науковедение. — 2014. — № 5 (24). — С. 1–12.
6. 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.
7. Селиверстов Я. А. Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах / Я. А. Селиверстов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2013. — № 1. — С. 43–49.
8. Селиверстов С. А. Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы / С. А. Селиверстов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 92–100.
9. Селиверстов Я. А. Использование правила резолюций в вопросно-ответной процедуре транспортного планировщика / Я. А. Селиверстов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 145–152.
10. Селиверстов Я. А. О логико-алгебраическом представлении транспортно-логистического процесса / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2014. — № 4 (200). — С. 57–68.
11. Селиверстов С. А. Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения / С. А. Селиверстов, Я. А. Селиверстов // Интернет-журнал Науковедение. — 2014. — № 3. — С. 1–33.
12. 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.
13. Mikulski J. Using telematics in transport / J. Mikulski // TST 2010. — Vol. 104. — P. 175–182.
14. Mikulski J. Role of telematics in reducing the negative environmental impact of transport / J. Mikulski, A. Kwaśny // TST. — 2010. — Vol. 104. — P. 11–29.
15. Селиверстов С. А. Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта / С. А. Селиверстов // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 69–80.
16. Селиверстов Я. А. Формальная аксиоматика теории функционального субъективного потребительского поведения / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. — 2014. — № 4. — С. 34–48.
17. Селиверстов Я. А. Основы теории субъективных функциональных возможностей рационального выбора [Электронный ресурс] / Я. А. Селиверстов // Интернет-журнал Науковедение. — 2014. — № 4 (23). — С. 1–39.
18. Куватов В. И. Пути ускорения перевозок и повышения безопасности автомобильного транспорта / В. И. Куватов, Н. В. Шаталова, В. А. Онов // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2013. — № 2 (26). — С. 26–33.
19. Van Wee B. The Transport System and Transport Policy: An Introduction, Cheltenham: Edward Elgar / B. Van Wee, J.-A. Annema, D. Banister. — 2013. — P. 424.
20. Xue J. Short-Time Traffic Flow Prediction Based on Chaos Time Series Theory / J. Xue, Z. Shi // Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. — 2008. — № 8 (5). — P. 68–72.
21. Castillo E. Predicting traffic flow using Bayesian networks / E. Castillo, J. M. Menéndez, S. Sánchez-Cambronero // Transportation Research Part B: Methodological. — 2008. — № 42 (5). — P. 482–509.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 629.113

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.;

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.;

В. Н. Тимофеев,
канд. техн. наук, доц.

СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

CONTEMPORARY CONCEPTION OF REGULATION IN COOLING SYSTEM OF SHIP'S DIESEL ENGINES

Статья посвящена проблеме обеспечения оптимального охлаждения судовых дизелей, которое обеспечивает требуемые экономические, ресурсные и экологические показатели их работы на различных эксплуатационных режимах. Проведенные исследования показывают, что для современных дизелей с высоким уровнем форсированности необходимо осуществлять автоматическое регулирование температуры охлаждающей жидкости, давления в контуре охлаждения и физико-химических свойств охлаждающей жидкости. Приведены функциональные и структурные схемы систем автоматического регулирования охлаждения дизеля. Сформулированы основные принципы регулирования охлаждения судовых дизелей. Оптимальное тепловое состояние обеспечивается связанным регулированием параметров охлаждения и наддува. Отмечается, что системы автоматического регулирования должны базироваться на современных датчиках параметров и свойств охлаждающей жидкости, программируемых микропроцессорных блоках управления и исполнительных устройствах с электромагнитным управлением. Актуальной задачей является разработка управляющих программ для систем регулирования охлаждения.

The article is devoted to the problem of ensuring of optimal cooling for ship's diesel engines, which is necessary for required economical, ecological and resources indexes of engine's function on different exploitation regimes. Investigations, which were conducted, showed that for modern diesel engines with high level of forces automatic regulation of temperature of cooling liquid, pressure in cooling system and properties of cooling liquid is necessary. In the article function and structure schemes of system of automatic regulation of diesel engines' cooling are demonstrated. Main principles of cooling regulation are formulated in the article. Optimal heat conduction of diesel engines is ensured by connected regulation of parameters of cooling system and supercharge system. Systems of the automatic regulation must be based on modern sensitive elements for fixing temperature, pressure and properties of cooling liquid, microprocessor block of management with management program and executive mechanism with electromagnetic management. Creation of management program for regulation cooling system is a actual scientific problem.

Ключевые слова: судовые дизели, параметры охлаждения, автоматическое регулирование, качество регулирования, функциональные и структурные схемы, принципы регулирования охлаждения.

Key words: ship's diesel engines, parameters of cooling, automatic regulation, quality of regulation, function and structure schemes, principles of cooling regulation.

ТЕПЛОВОЕ состояние судового дизеля, обеспечиваемое эффективной работой системы охлаждения, оказывает определяющее влияние на его технико-экономические показатели, такие как надежность, топливная экономичность и экологическая безопасность [1] – [4]. Важнейшее значение имеет тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы, которое

определяет качество протекания рабочего цикла, условия смазывания этих деталей, величину механических потерь, расход масла на угар и интенсивность изнашивания в сопряжении *втулка цилиндра – поршневой комплект*, скорость газовой коррозии и ресурс выпускных клапанов, вероятность образования трещин в крышках и втулках цилиндров, днищах поршней, интенсивность эрозионно-коррозионных разрушений омываемых охлаждающей жидкостью поверхностей втулок и блоков цилиндров и накипеобразования в рубашке охлаждения.

Дизели, эксплуатируемые в составе судовых энергетических установок (СЭУ) судов, значительную часть времени работают на неуставившихся и переменных режимах. Наиболее характерными являются переходные режимы, связанные с многочисленными реверсами и маневрированием, для двигателей судов, работающих в ледовых условиях, судов внутреннего плавания при прохождении сложных участков, гидроузлов и каналов, а также судов портового флота [5]. Во время неуставившихся режимов работы и переходных процессов температура наиболее теплонагруженных деталей цилиндропоршневой группы претерпевает значительные изменения, а температура охлаждающей жидкости остается при этом практически неизменной. Имеет место так называемая *тепловая инерционность*. Рабочие процессы при неуставившихся и переходных режимах протекают при температуре стенок камеры сгорания, существенно отличающейся от значений, характерных для уставившегося режима номинальной мощности, который является расчетным. При резких изменениях режимов работы дизеля локальная температура его деталей может превышать температуру, характерную для режима номинальной мощности. Неуставившееся температурное состояние деталей сопровождается ростом разности температур на их поверхностях и увеличением температурных напряжений. Данная проблема особенно актуальна для современных и перспективных судовых дизелей, имеющих высокий уровень форсированности [6], в которых тепловые нагрузки и температурные напряжения становятся сопоставимыми с механическими, во многих случаях лимитируя надежность двигателей.

Для решения указанной проблемы необходимо обеспечить оптимальный температурный уровень судового дизеля не только на уставившихся режимах работы, но и на переходных, неуставившихся режимах. Оптимальным следует считать такой температурный уровень, при котором материалы деталей сохраняют свои прочностные свойства, моторные масла сохраняют высокую смазывающую и несущую способность, а потери теплоты через систему охлаждения минимальны. На работе двигателя отрицательно сказывается как недостаточное, так и излишнее охлаждение. Перегрев двигателя вызывает ухудшение наполнения цилиндров воздушным зарядом, неполное сгорание топлива и его повышенный расход, нарушение условий жидкостного трения, возникновение повышенных износов и задиров трущихся поверхностей в узлах трения, повышенный расход масла на угар, снижение прочностных свойств материалов и появление термоусталостных разрушений. Переохлаждение двигателя приводит к чрезмерному повышению вязкости масла и, соответственно, к возрастанию механических потерь, снижению эффективного КПД двигателя, а также к ухудшению смесеобразования и воспламенения, переносу процесса сгорания на линию расширения и повышенным расходам топлива. Жидкостные системы охлаждения призваны обеспечивать надежную работу двигателей в течение продолжительного времени при максимальной температуре рабочего цикла, достигающей в современных двигателях 1700 – 2700 °С.

Конструкция систем охлаждения и их отдельных элементов должна обеспечивать возможность гибкого регулирования теплоотвода и минимальные затраты энергии, необходимые для циркуляции теплоносителя. Очевидно, что для современных и перспективных судовых дизелей, к которым предъявляются достаточно высокие требования как по экономическим, так и по ресурсным показателям, обеспечение оптимального температурного уровня возможно лишь путем качественного автоматического регулирования теплонапряженного состояния двигателя и режимов охлаждения [7].

Влияние факторов, оказывающих влияние на теплонапряженное состояние дизеля, может быть представлено в виде схемы, приведенной на рис. 1. Для современного уровня двигателестроения наиболее рациональным и целесообразным является совершенствование системы авто-

матического регулирования теплового состояния дизеля (САРТ) за счет воздействия на режимы охлаждения двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Функционирование систем охлаждения судовых дизелей целесообразно характеризовать двумя группами показателей: *режимными*, такими как температура охлаждающей жидкости, ее расход, перепад температур в контурах охлаждения, давление в системе охлаждения, и *водно-химическими*, характеризующими физические и химические свойства охлаждающей жидкости [8]. Влияние физико-химических и теплофизических свойств охлаждающих жидкостей на ресурсные, экономические и экологические показатели работы дизелей является крайне важным фактором [9], [10]. В связи с этим современная концепция регулирования охлаждения должна предусматривать как автоматическое регулирование режимных показателей, так и регулирование водно-химических параметров охлаждения.

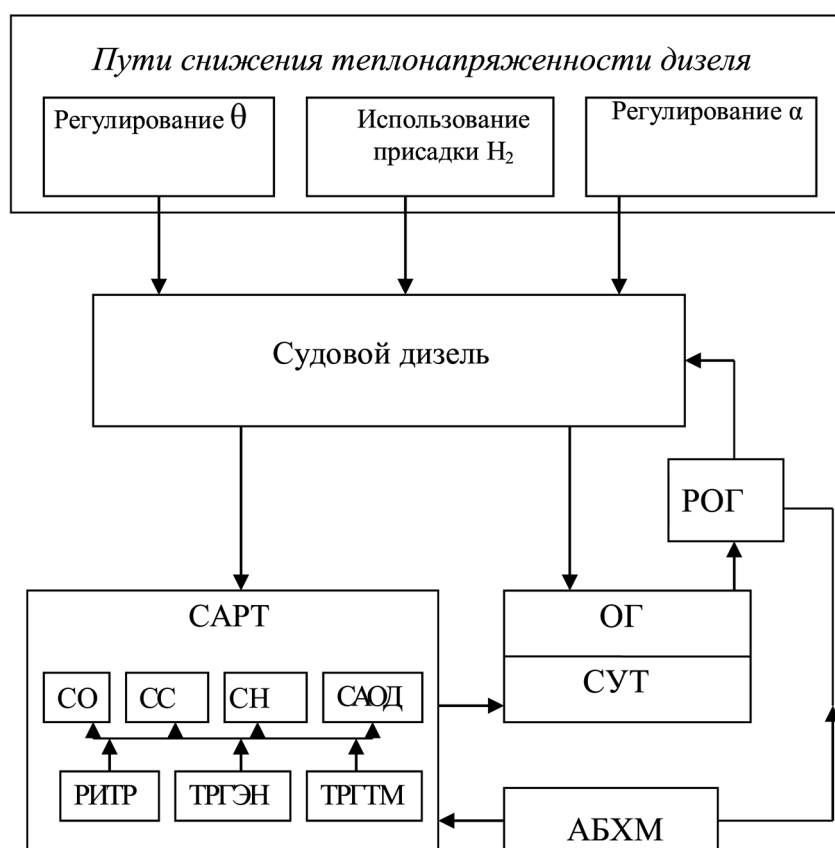


Рис. 1. Факторы, определяющие температурное и теплонапряженное состояние дизеля:

θ – угол опережения впрыскивания топлива;

H_2 – водород в виде присадки; α – коэффициент избытка воздуха

Условные обозначения: РОГ – «холодная» рециркуляция ОГ; ОГ – отработавшие газы;

СУТ – система утилизации теплоты; АБХМ – абсорбционная холодильная машина;

САРТ – система автоматического регулирования теплового состояния ДВС:

СО – система охлаждения; СС – система смазки; СН – система наддува;

САОД – система аварийной остановки дизеля; РИТР – релейно-импульсный терморегулятор;

ТРГЭН – терморегулятор с электронагревателем;

ТРГТМ – терморегулятор с термоэлектрическим модулем

Преимущества, которые могут быть получены от внедрения систем автоматического регулирования охлаждения в судовых дизельных установках, сводятся к следующему.

1. Обслуживающий персонал освобождается от непосредственного наблюдения за режимными и водно-химическими параметрами в системах дизеля и от труда, связанного с ручным управлением.

2. Автоматизированное управление способно обеспечить работу судового дизеля при оптимальных (квазиоптимальных) параметрах охлаждения.

Таким образом, проблемами автоматического регулирования температурного состояния ДВС являются задачи повышения точности и качества процесса регулирования. При этом следует отметить, что при синтезе систем требуется добиться не просто заданных показателей качества, таких как точность, запас устойчивости, быстродействие, приемлемый характер переходных процессов и др., но и соответствия параметров охлаждения режиму работы двигателя.

Синтез структуры управляющего устройства следует выполнять в два этапа. На первом этапе определяется оптимальный алгоритм регулирования, на втором – осуществляется его техническая реализация. Эти системы будут отличаться от оптимальной, т. е. будут близкими к оптимальной или квазиоптимальной. При этом, отказавшись от построения «идеальной» оптимальной системы и поставив более скромную задачу – осуществить только квазиоптимальное регулирование, можно значительно упростить техническое выполнение системы.

Вопрос о количественной оценке близости квазиоптимальной системы соответствующей ей «идеальной» является нелегким, недостаточно разработанным теоретически. Практически такая оценка может быть проведена путем сравнения показателей выполненной реальной системы с показателями, полученными при расчете математической модели. Однако при этом неизбежно приходится сталкиваться с вопросом о том, какова количественная оценка близости математической модели и реальной системы. В общем случае система регулирования охлаждения дизеля состоит из программатора-задатчика (П) 1, вырабатывающего задающее воздействие (программу, программное движение); регулятора (Р) 2 и объекта управления (ОУ) 3 – рис. 2.

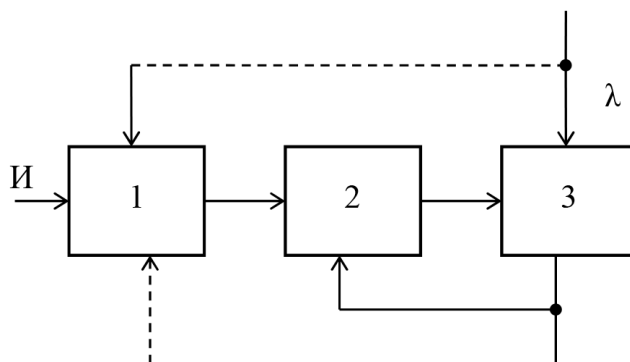


Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования:
1 – программатор; 2 – терморегулятор; 3 – объект управления

На схеме символ *И* обозначает совокупность внешней информации, которая поступает на программатор. Задача синтеза оптимальной системы состоит в том, чтобы для заданного объекта синтезировать регулятор и программатор, которые, в определенном смысле, наилучшим образом решают поставленную задачу регулирования. Математически эти задачи могут быть сформулированы единообразно и решаться одними и теми же методами, но в то же время они имеют специфические особенности, которые делают целесообразным на определенном этапе их раздельное рассмотрение. Эти особенности обуславливаются тем, что решение первой задачи связано, как правило, с определением программного регулирования, а решение второй – с определением регулирования с обратной связью. Таким образом, программное регулирование – это управление в виде функции от времени, а регулирование с обратной связью – регулирование в виде функции от фазовых координат.

Системы с оптимальным программатором являются оптимальными по режиму регулирования, а системы с оптимальным терморегулятором (ТРГ) – оптимальными по переходному режиму. В случае использования программатора и ТРГ получим систему автоматического регулирования.

Так как программное движение в САРГ дизеля задается, требуется определить наилучший ТРГ, в результате чего получим оптимальную систему автоматического регулирования.

Систему автоматического регулирования температурного состояния дизеля можно структурно рассматривать как одноконтурную, приведенную на рис. 3 в виде условных изображений звеньев и связей между ними [11]. В общем виде система состоит из двух укрупненных структурных звеньев: объекта и регулятора. На рис. 3 линиями обозначены связи между звеньями и отмечено кружком местоположение регулирующего органа (РО). Объект с регулятором определяет главную обратную связь. Видно, что система автоматического регулирования температуры является замкнутой системой звеньев направленного действия.

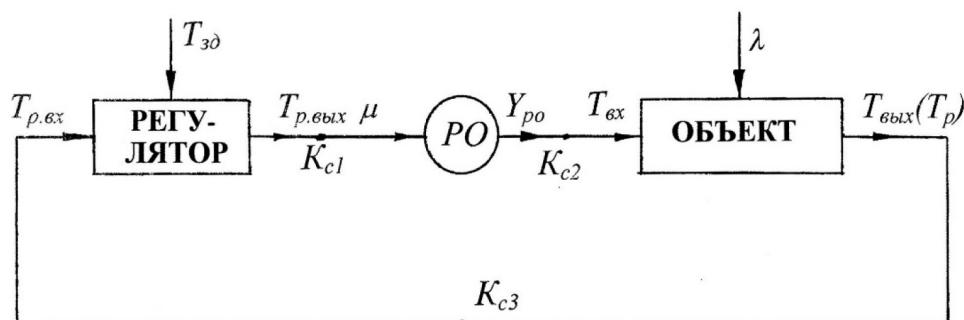


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического регулирования температурного состояния судового дизеля

Объект характеризуется координатами: температурой входа $T_{вх}$, температурой выхода $T_{вых}(T_p)$ и координатой нагрузки λ , которая служит второй входной координатой в дизеле. Регулятор характеризуется температурой входа $T_{р.вх}$, температурой выхода $T_{р.вых}$ и температурой задания $T_{зд}$. На линиях связи указывают передаточные коэффициенты связей K_{c1} , K_{c2} , K_{c3} .

С помощью специальных настроечных органов задания, которыми оборудуются терморегуляторы, можно установить то или иное значение температуры задания $T_{зд}$. В соответствии с этим параметром определиться и значение регулируемого параметра, которое будет поддерживаться ТРГ. При помощи возмущающего воздействия λ объект меняет заданный режим. Возмущающими воздействиями принято называть воздействия, стремящиеся нарушить требуемую функциональную связь между задающим воздействием и регулируемой температурой. При этом под задающим воздействием понимается воздействие на систему, определяющее необходимый закон изменения регулируемой температуры. Действие ТРГ на объект, в результате которого последний возвращается в равновесный режим при обеспечении необходимого значения параметра, назовем *регулирующим воздействием* μ . ТРГ осуществляет воздействие на дизель через РО, который преобразует изменение получаемой на выходе из ТРГ температуры воды, поступающей на вход в дизель. Требования к точности поддержания регулируемой температуры в статике и динамике допускают здесь применение простейших конструкций статических ТРГ и регулирование только по отклонению регулируемой температуры. ТРГ, а также дизель с его системой охлаждения являются составными частями системы регулирования температуры охлаждающей воды. Отклонение регулируемой температуры охлаждающей воды от заданного значения зависит, с одной стороны, от свойств, ТРГ а с другой – от свойств самого дизеля с его системой охлаждения.

Таким образом, операция регулирования температуры дизеля включает пять основных этапов:

- измерение регулируемой температуры;
- сравнение измеренной величины со значением, заданным уставкой;
- обработку этой разности (ошибки) в ТРГ;
- переработку управляющего сигнала в регулирующее воздействие;
- возвращение регулируемой температуры к заданному значению под влиянием регулирующего воздействия.

В существующих системах автоматического регулирования температурного состояния ДВС на всех режимах работы дизеля алгоритм функционирования содержит предписание о поддержании постоянного значения регулируемой температуры охлаждающей жидкости, которая является системой стабилизации. Используя в этой работе кроме системы стабилизации, электрические элементы в исполнительно регулирующем устройстве ТРГ, предполагается создать систему программного регулирования, которая содержит алгоритм функционирования САРТ, т. е. предписание об изменении регулируемой температуры в соответствии с заранее заданной функцией. Необходимое изменение регулируемой температуры по нагрузке дизеля обеспечивается в этой системе по строго определенной программе. На вход объекта поступает регулирующее (управляющее) воздействие μ от ТРГ. Если таких воздействий несколько: $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$, то их можно объединить в вектор $\bar{\mu}$ с координатами μ_j ($j = 1, \dots, r$): $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_r)$.

На вход ТРГ подается задающее воздействие $T_{зд}$, представляющее собой инструкцию о том, какой должна быть выходная температура (регулируемая температура) $T_{вых}(T_p)$ охлаждающей жидкости. Эта инструкция должна конкретизировать цель регулирования. Инструкция может представлять собой коллекцию из n величин $T_1^*, \dots, T_n^*$, которые будем считать координатами вектора T^* : $\bar{T}^* = (T_1^*, \dots, T_n^*)$. Например, можно принять, чтобы в идеальном случае удовлетворялись условия $T_i = T_i^*$ ($i = 1, \dots, n$), где T_i^* – заданные функции времени.

Отклонение величины выходной (регулируемой) температуры $T_{вых}(T_p)$ от установленных значений может произойти ввиду следующих причин:

- неправильное, неточное или запоздалое использование ТРГ содержащейся в нем или входящей к нему информации о характеристиках объекта и о цели регулирования, этот недостаток, в принципе, может быть исправлен усовершенствованием закона действия (алгоритма) ТРГ.

- ограничение ресурсов регулирования, т. е. невозможность по тем или иным причинам подавать на объект такие регулирующие воздействия $\bar{\mu}$, которые могут обеспечить требуемое поведение $\bar{\mu}$ объекта. (В условиях эксплуатации дизелей ресурсы управления всегда ограничены, и это обстоятельство необходимо учитывать).

- некоторое заранее непредвиденное и не контролируемое возмущающее воздействие λ , влияющее на его выходную величину, например, резкое изменение температуры охлаждающей забортной воды, поступающей на объект. (Если на различные части объекта действуют возмущения $\lambda_1, \dots, \lambda_l$, будем представлять их в виде вектора $\bar{\lambda}$: $\bar{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_l)$).

Кроме того, возмущающее воздействие $\lambda_1, \dots, \lambda_l$ или помехи, воздействующие на управляемый объект, могут вызывать заранее непредвиденное изменение его характеристик. Влияние изменения нагрузки на объект можно рассматривать как частный случай действия помехи.

Предположим, что алгоритм ТРГ обеспечивает успешную работу системы при определенных характеристиках объекта. Однако при изменении возмущающих воздействий работа системы может ухудшиться, и величина $T_{вых}(T_p)$ станет значительно отклоняться от номинального значения.

Принцип обратной связи во многих случаях создает возможность удовлетворения требованиям, предъявляемым к величине $\bar{T}_p$, даже при наличии значительной помехи $\bar{\lambda}$, действующей на объект. Однако характеристики объектов в судовых дизелях сложны и быстро изменяются в широком диапазоне, поэтому задача регулирования затрудняется. В таких случаях получение информации о помехе $\bar{\lambda}$ или хотя бы о некоторых составляющих $\lambda_1, \dots, \lambda_l$ может оказать существенную помощь, улучшив результат регулирования. Пусть помеха измеряется и результат измерения поступает (см. пунктирную линию на рис. 2) в регулирующее устройство, которое может рассчитать и подать такое регулирующее воздействие $\bar{\mu}$, которое скомпенсирует, нейтрализует влияние помехи $\bar{\lambda}$ и приведет выходную температуру $\bar{T}_p$ объекта в лучшее соответствие с требованиями. Этот прием назовем *компенсацией*. Цепь компенсации не является линией обратной связи, так как по ней передается значение входной, а не выходной величины объекта, т. е. система становится комбинированной.

Следует отметить, что область применения принципа компенсации гораздо уже области применения принципа обратной связи. Это объясняется главным образом тем, что на объект дей-

ствует большое количество различных помех $\lambda_1, \dots, \lambda_l$. Значительная часть этих помех вообще не поддается измерению и поэтому не может быть скомпенсирована с помощью цепи, обозначенной пунктирной линией на рис. 2. Даже если бы и существовала принципиальная возможность измерения множества помех λ_r , то расчет нейтрализующего их воздействия $\bar{\mu}$ был бы чрезмерно сложным. Поэтому регулирующее устройство оказалось бы слишком громоздким, а результаты работы системы могли бы все-таки быть недостаточно успешными, так как не все помехи можно измерить. Между тем принцип обратной связи позволяет измерять только лишь отклонение регулируемой температуры $\bar{T}_p$ от требований и формировать регулирующее воздействие $\bar{\mu}$, которое приближает T_p к требуемому значению. Очевидно, что принцип обратной связи гораздо более универсален и, вообще говоря, приводит к более простым методам регулирования, чем принцип компенсации. Однако в случае использования электронных элементов в дизеле измерение возмущающего воздействия при помощи электрических средств осуществляется легко, поэтому метод компенсации или его сочетание с принципом обратной связи оказывается наиболее удачным.

В САРТ дизеля объект задан и его свойства изменять нельзя. Между тем алгоритм регулирующего устройства большей частью вовсе не задан, и его можно выбирать из широкого класса возможных алгоритмов. Задача построения системы сводится, таким образом, к задаче разработки такого регулирующего устройства, которое, в известном смысле, наилучшим образом управляет объектом.

В судовых дизелях к ТРГ обычно предъявляется ряд самостоятельных требований, не имеющих прямого отношения к объекту. Допустим, что, если это потребуется, то ТРГ может быть любым – например, сколько угодно сложным, а также безынерционным. Такое отсутствие ограничений обусловлено обширными возможностями современной вычислительной техники. Кроме того, наложение дополнительных ограничений на регулирующее устройство может резко усложнить задачу нахождения оптимальной системы. Такое усложнение возникает при наличии требования о том, чтобы сложность или надежность либо стоимость регулирующего устройства μ не превышали допустимый уровень.

В число характеристик объекта входят ограничения различного вида. Например, регулирующие воздействия $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$, входящие в состав вектора $\bar{\mu}$ (см. рис. 3), не могут иметь любые значения. В частности, они не могут, вследствие физических свойств объекта, или не должны (например, из-за нарушения нормальной работы объекта) превышать некоторые пределы, например, $|\mu_1| \leq U_1, \dots, |\mu_r| \leq U_r$, где $U_1, \dots, U_r$ – заданные константы.

В состав требований, предъявляемых к поведению объекта, входит задание определенной цели регулирования. В любом случае цель регулирования можно рассматривать как достижение некоторой величины G – критерия оптимальности. В зависимости от требований необходим либо максимум, либо минимум величины G . В общем случае критерий оптимальности зависит как от задающего воздействия $\bar{T}_{\text{зад}}$, так и от выходной величины $\bar{T}_p$. Он может зависеть также от μ и $\bar{\lambda}$ или от времени t . Пусть для определенности требуется, чтобы величина G была минимальна:

$$G(T_p, \bar{T}_{\text{зад}}, \bar{\lambda}, t) = \min. \quad (1)$$

Это условие представляет собой аналитическую формулировку цели регулирования. Отметим, что G является функциональным числом, т. е. зависящим от вида функций регулируемой температуры T_p , регулирующих воздействий μ и помех λ от времени t . Например, в частном случае G имеет вид

$$G = M \int_0^N [T_p(t) - T_{\text{зад}}(t)] dt, \quad (2)$$

где N – фиксированная величина.

Из формулы (1) видно, что величина G зависит от вида функций $T_p(t)$ и $T_{\text{зад}}(t)$ на интервале $0 < t < N$. Из этой формулы для G можно определить не только возможное минимальное значение $G_{\min}$, но и оценить ухудшение работы системы при отклонении ее от номинального значения.

Мерой ухудшения может явиться разность $G - G_{\min}$ или какая-либо монотонная функция этой разности, обращающаяся в нуль при $G = G_{\min}$.

Возможны различные линии классификации по типам критериев G . Так, можно делить критерии оптимальности в зависимости от того, относятся они к переходному или установившемуся процессу в системе. Часто критерием оптимальности в переходном процессе удобно считать время регулирования или величину максимального отклонения температуры процесса от некоторой заданной величины или функции времени. В этом случае требуется, чтобы в оптимальной системе был достигнут минимум максимального отклонения, так называемый минимакс.

Важно отметить, что нельзя ставить задачу исследования одновременного достижения экстремума для двух или нескольких переменных. Действительно, экстремумы у различных функций или функционалов не соответствуют одному и тому же значению совокупности аргументов. Поэтому значений аргументов, соответствующих экстремуму одновременно двух и более функций и функционалов, в общем случае не существует. Можно ставить лишь задачу достижения экстремума одной функции или функционала, но при этом накладывать дополнительные условия в любом количестве об ограничении других функций или функционалов. Сами эти ограничения могут носить сложный характер. Например, можно потребовать такого подбора вектора $\bar{T}$, чтобы функция $G_1(\bar{T})$ достигла максимума, но при этом значения других функций $G_2(\bar{T})$ и $G_3(\bar{T})$ не отклонялись в процентном отношении от своих экстремумов более чем на ε_2 и ε_3 соответственно. Вопрос о существовании значения T , удовлетворяющего этим условиям, может быть решен лишь при рассмотрении конкретной системы.

В настоящее время известно несколько методов синтеза оптимальных по быстродействию систем управления объектами с запаздыванием. Наиболее широко применяют метод, основанный на компенсации временного запаздывания в оптимальных системах по методу Р. Бэсса, изложенный в публикации [12]. Сущность его состоит в том, что для компенсации запаздывания в оптимальных системах при построении функции аргумента управления вводится поправка на период времени τ с тем, чтобы регулирующие воздействия системы с запаздыванием и той же системы без запаздывания совпадали. В математической интерпретации это означает, что в фазовом пространстве поверхность регулирования, упреждающая по времени на τ поверхность переключения, строится по заданной поверхности переключения той же системы без запаздывания.

К основному недостатку метода компенсации запаздывания следует отнести то, что получаемая оптимальная поверхность переключения в компенсированных системах вблизи начала координат фазового пространства оказывается неоднозначной. При определенных начальных условиях движение в системе становится неоптимальным: увеличивается число интервалов переключения, возрастает время переходного процесса. При этом отклонение фазовой траектории от оптимальной может быть существенным и различным, но оценить его заранее сложно. Избавиться от этого недостатка можно лишь с помощью использования при синтезе специальных подходов. При построении оптимального управляющего устройства, в основу которого положен метод компенсации временного запаздывания, для образования упрежденных на время τ фазовых координат применяется модель объекта регулирования. Воспроизводя оптимальную линию переключения аналогичной системы без запаздывания, удастся получить оптимальные по быстродействию переходные процессы в нейтральной системе с транспортным запаздыванием.

Качество регулирования теплового состояния дизеля может быть повышено путем увеличения входных сигналов. Функциональные схемы автоматического регулирования теплового состояния в традиционной двухконтурной системе охлаждения приведены на рис. 4. Наиболее типичной является одномерная схема регулирования (см. рис. 4 а), в которой объектом регулирования является температура охлаждающей жидкости. Однако более предпочтительны многомерные системы регулирования (см. рис. 4 б), в которых выходными параметрами являются значения температуры высоконагретой детали $T_{\text{дет}}$, охлаждающей жидкости $T_{\text{ж}}$ и моторного масла $T_{\text{м}}$. Число регулирующих воздействий μ_i в таких системах должно быть не менее количества регулируемых

системой температур. Поддержание оптимального теплового состояния двигателя может быть обеспечено, если регулирование температуры охлаждающей жидкости $T_{\text{ж}}$ дополнить регулированием температуры высоконагретой детали $T_{\text{дет}}$. В этом случае должно осуществляться два регулирующих воздействия, одним из которых может быть управляемое давление в системе охлаждения. Управление давлением в системе охлаждения в зависимости от режима работы двигателя предлагается осуществлять при помощи устройства, описанного в работах [13], [14]. Регулирование давления во внутреннем контуре системы жидкостного охлаждения приобретает особое значение при переходе на высокотемпературное охлаждение, которое обладает определенными важными достоинствами и получает все более широкое распространение в СЭУ.

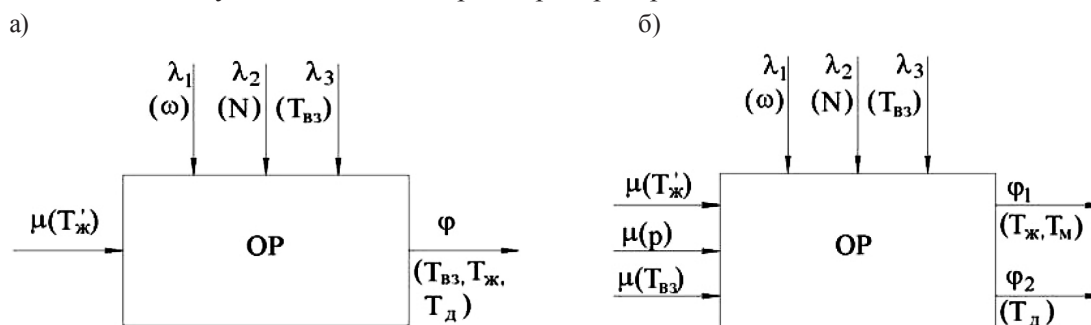


Рис. 4. Схема ДВС как объекта регулирования теплового состояния:
а – одномерная; б – многомерная

Температурное и теплонапряженное состояние современных судовых дизелей, оснащенных системами газотурбинного наддува, зависит не только от температуры охлаждающей жидкости, но и от температуры воздушного заряда, поступающего в цилиндры двигателя. В связи с этим оптимальное тепловое состояние дизеля и достижение наилучших экономических, экологических и ресурсных показателей работы двигателя на различных эксплуатационных режимах возможно лишь при условии связанного регулирования температур охлаждающей жидкости и наддувочного воздуха. Для осуществления такого регулирования необходимо определить оптимальное сочетание давления наддувочного воздуха и его температуры для различных режимов работы двигателя, запрограммировать управление данными параметрами и модернизировать систему газотурбинного наддува, установив в ней автоматические регуляторы параметров наддува. Поставленные задачи решались в работах [15], [16].

Водно-химические режимы охлаждения задаются путем введения в охлаждающую воду внутреннего контура систем охлаждения судовых дизелей, комплексных многофункциональных присадок химического типа, содержащих поверхностно-активные вещества и водорастворимые полимеры, которые способны не только обеспечивать эффективную защиту элементов систем охлаждения от кавитационно-коррозионных разрушений и накипеобразования, но и оказывать направленное влияние на процессы теплообмена в полостях охлаждения [17]. В процессе эксплуатации происходит старение охлаждающей жидкости в результате деструкции введенных присадок под действием тепловых и физических воздействий.

С физической точки зрения следствием термомеханического воздействия, возникающего при прокачивании жидкости по системе охлаждения, является растяжение межатомных связей в молекулах веществ, входящих в раствор, межмолекулярных связей в макромолекулах полимеров и связей, удерживающих ПАВ в мицеллярных образованиях. Конечным результатом такого растяжения является разрыв связей. Очевидно, что, в первую очередь, будут разрушаться наиболее слабые связи. Механизм старения охлаждающих жидкостей и закономерности изменения основных физико-химических свойств жидкости в зависимости от условий эксплуатации и режимных параметров охлаждения исследованы в работе [18]. Контроль и восстановление требуемых эксплуатационных свойств охлаждающей жидкости в автоматическом режиме возможны при усло-

вии использования модернизированных САР охлаждения дизелей, включающих устройства для анализа физико-химических свойств охлаждающей жидкости и коррекции ее состава [19], [20].

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие принципы современной концепции регулирования охлаждения судовых дизелей.

1. Регулируемыми параметрами жидкостных систем охлаждения должны служить температура охлаждающей жидкости, давление в контуре охлаждения и физико-химические свойства охлаждающей жидкости.

2. Входными сигналами САР должны являться данные о режиме работы двигателя, его тепловом состоянии и свойствах охлаждающей жидкости.

3. Обеспечение оптимального теплового состояния дизеля на различных эксплуатационных режимах возможно лишь при условии связанного управления параметрами систем охлаждения и наддува общим блоком управления.

4. В качестве блоков управления САР охлаждения и наддува следует использовать программируемые устройства на основе микропроцессорной техники.

5. В качестве исполнительных механизмов САР с целью обеспечения требуемого быстродействия необходимо использовать устройства с электромагнитным управлением.

Реализация предлагаемой концепции позволит максимально полно использовать ресурсы совершенствования охлаждения судовых дизелей для повышения экономических, экологических и ресурсных показателей их работы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку управляющих программ, обеспечивающих оптимальное тепловое состояние судового дизеля с учетом особенностей его конструкции, условий эксплуатации и режимов работы.

Список литературы

1. Кавтарадзе Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: монография / Р. З. Кавтарадзе. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 592 с.
2. Woschni G. Untersuchung des Wärmetransportes zwischen Kolben, Kolbenringen und Zylinderbüchse / G. Woschni, K. Benedikt, K. Zeilinger // MTZ: Motortech. — 1998. — Vol. 9. — P. 556–563.
3. Кузьмин Н. А. Критические значения температур деталей ЦПГ двигателей / Н. А. Кузьмин, О. П. Голубев // Сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф. «Проектирование, испытания, эксплуатация транспортных машин и транспортно-технологических комплексов» / НГТУ. — Н. Новгород, 2005. — С. 258–260.
4. Жуков В. А. Влияние параметров охлаждения на надежность комбинированных двигателей: монография / В. А. Жуков. — Рыбинск: РГАТУ им. П. А. Соловьева, 2012. — 172 с.
5. Малиновский М. А. Обеспечение надежности судовых дизелей на эксплуатационных и особых режимах работы / М. А. Малиновский, А. А. Фока, В. И. Ролинский [и др.]. — Одесса: Феникс, 2007. — 149 с.
6. Конкс Г. А. Современные подходы к конструированию поршневых двигателей / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — М.: Изд-во «МОРКНИГА», 2009. — 388 с.
7. Безюков О. К. Совершенствование регулирования теплового состояния судовых ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. А. Тарасов // Тр. II-го Междунар. науч.-техн. семинара «Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». — СПб.: СПб.ГУВК, 2008. — С. 58–63.
8. Безюков О. К. Комплексная оптимизация параметров охлаждения судовых энергетических установок / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 51–60.
9. Безюков О. К. Охлаждающие жидкости транспортных ДВС: монография / О. К. Безюков, В. А. Жуков. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. ун-та водных коммуникаций, 2009. — 262 с.
10. Жуков В. А. Зависимость эксплуатационных показателей транспортных ДВС от свойств охлаждающих жидкостей / В. А. Жуков // Вестник машиностроения. — 2010. — № 12. — С. 58–62.
11. Тимофеев В. Н. Температурный режим двигателей внутреннего сгорания и его регулирование / В. Н. Тимофеев. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. — 358 с.

12. Хахулин Г. Ф. Основы моделирования АСУ / Г. Ф. Хахулин, Е. А. Сокурено. — М.: Изд-во МАИ, 1990. — 60 с.
13. Безюков О. К. Совершенствование конструкции систем охлаждения судовых двигателей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. А. Тарасов // Развитие транспорта в регионах России: проблемы и перспективы: материалы Всерос. науч.-практ. конф. — Киров, 2007. — С. 67–70.
14. Пат. 2459093 РФ МПК F01P 5/10. Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / О. К. Безюков, В. А. Жуков; Опубл. 20.08.2012. Бюл. № 23. — 7 с.
15. Жуков В. А. Выбор параметров газотурбинного наддува конверсионного двигателя / В. А. Жуков, М. С. Курин; под общ. ред. О. К. Безюкова // Тр. Междунар. науч.-техн. семинара «Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». — СПб.: Изд-во «ПаркКом», 2006. — С. 66–71.
16. Жуков В. А. Модернизация системы газотурбинного наддува конвертированного дизеля / В. А. Жуков, М. С. Курин // Вестник машиностроения. — 2007. — № 3. — С. 17–19.
17. Безюков О. К. Теплоносители систем охлаждения транспортных ДВС и способы обеспечения их эксплуатационных свойств / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. В. Жукова // Инженерный журнал. — 2009. — № 9. — С. 51–54.
18. Безюков О. К. Математическая модель старения охлаждающих жидкостей судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. В. Жукова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2009. — № 2. — С. 76–83.
19. Жуков В. А. Контроль качества теплоносителей жидкостных систем охлаждения / В. А. Жуков // Контроль. Диагностика. — 2011. — № 9. — С. 66–72.
20. Пат. 2453714 РФ МПК F01P 5/10 Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / В. А. Жуков; Опубл. 20.06.2012. Бюл. № 17. — 7 с.

УДК 629.5.03: 632.151

А. А. Иванченко,
д-р техн. наук, проф.;

А. П. Петров,
канд. техн. наук, доц.;

Г. Е. Живлюк,
канд. техн. наук

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУДОВ И РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS AND REGULATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS

Проанализировано нормирование выбросов вредных веществ энергетическими установками речных и морских судов, включая парниковые газы (выбросы диоксида углерода), с целью предотвращения загрязнения окружающей среды, являющееся одной из главных задач международных и национальных организаций. Сейчас уже широко известно, что в поисках критерия оценки совершенства судна пришли к оценке энергетической эффективности строящихся судов по конструктивному коэффициенту CO_2 , который определяется в выбросах диоксида углерода на тонно-милю перемещения грузов. Рассмотрены вопросы формирования понятия «конструктивный коэффициент энергетической эффективности судна – ККЭЭ». Методы его аналитической оценки и расчета для различных типов судов существенно отличаются. С учетом этого обстоятельства рассмотрены особенности оценки уровня выбросов парниковых газов с судов. В значительной степени это касается накатных судов и газозовов. Отмечено влияние отдельных конструктивных факторов на величину ККЭЭ.

Analyzed the regulation of emissions of harmful substances power plants river and sea vessels in the part of greenhouse gases (carbon dioxide emissions) in order prevented, of environmental pollution, which is one of the main objectives of the international and national organizations. It is now widely known that in the search for excellence criterion for evaluating the ship came to the assessment of the energy efficiency of vessels under construction for a constructive factor of CO₂, which is defined in the emissions of carbon dioxide per ton-mile of freight movement. The problems of formation of the concept of “Energy Efficiency Design Index – EEDI” were considered. Methods of analytical evaluation and calculation for different types of ships differ significantly. With this in mind the peculiarities of assessing the level of greenhouse gas emissions from ships. To a large extent, it concerns the rolling of ships and LNG carriers. The influence of certain structural factors on the EEDI.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, энергоэффективность судна, защита морской среды.

Key words: greenhouse gas emissions, energy efficiency of the vessel, the protection of the marine environment.

ИСТОРИЯ вопроса о выбросах парниковых газов, в частности диоксида углерода CO₂, с судов морского транспорта и связанных с ними последствиях насчитывает более 15 лет. В сентябре 1997 г. на Международной конференции сторон Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78) была принята Резолюция 8 по вопросу выбросов углекислого газа с судов. Следуя указаниям данной резолюции, Международная морская организация (*International maritime organization – ИМО*, далее ИМО) приняла в декабре 2003 г. Резолюцию А.963(23) «Политика и практика ИМО, относящаяся к сокращению выбросов парниковых газов с судов». В этом документе отмечается, что сокращение таких выбросов может осуществляться посредством принятия технических и эксплуатационных мер. Здесь же указывается о необходимости разработки методологии описания эффективности судна с точки зрения выбросов парниковых газов с учетом того, что углекислый газ является основным парниковым газом, выбрасываемым с судов. (Следует отметить, что основными парниковыми газами, в порядке значимости их воздействия на тепловой баланс Земли, являются углекислый газ, метан и озон). Также в документе указывается о необходимости разработки руководства для применения на практике системы индексации выбросов парниковых газов.

Согласно результатам исследований, проведенных по поручению ИМО [1], общие выбросы CO₂ от судоходства составили в 2009 г. примерно 1 млрд т, что соответствовало примерно 3,3 % совокупных выбросов CO₂ в результате сжигания топлива. К 2020 г. выбросы от судоходства увеличатся, по прогнозам, более чем на 30 %, до 1,47 млрд т [2]. По данным [3], доля выбросов парниковых газов от международного судоходства в 2003 г. составила примерно 1,8 % от мировых выбросов CO₂. По данным на 2007 г., доля выбросов парниковых газов от международного судоходства составила примерно 2,7 % от мировых выбросов CO₂.

Энергоэффективность судна характеризует энергетические возможности технического средства при наименьших затратах ресурсов для выработки энергии. В ряде случаев, оценка энергоэффективности производится с учетом установленного на судне оборудования, пренебрегая возможностями применения инновационных технологий в энергетике, интегрированным подходом к подсчету тех возможностей повышения энергоэффективности, которые не очевидны, но присутствуют при проектировании судна. В простейшем случае оценка энергоэффективности производится по комплексному показателю качества СЭУ, исходя из ее расходных и ресурсных показателей.

В то же время, в современном двигателестроении и судостроении не только декларируется, но и происходит переход от частных случаев повышения КПД агрегата к комплексной интегральной оценке всех аспектов влияния на энергетические показатели судна. Повышение эффективности и экологической безопасности проекта были изучены на фоне необходимости удовлетворения требований ИМО, вступивших в силу в 2013 г. Исследования показали, что потенциал для экономии энергии велик, в некоторых случаях он достигает 50 % [4]. В связи с возникшей потребностью введения показателя, свидетельствующего об эффективности судна в отношении топливной

экономичности и выбросов парниковых газов, предлагалось ввести конструктивный индекс CO_2 , а также индикатор эксплуатационной эффективности, который определяет эффективность судна по количеству CO_2 в тоннах, выброшенного отдельной установкой за период рейса судна на тонну перевезенного груза на расстоянии в 1 милю.

Ввиду существенных различий конструктивных и энергетических особенностей технических показателей судов, назрел вопрос определения предельной величины конструктивного индекса CO_2 эксплуатируемых судов и судов новой постройки. В дальнейшем оценка эксплуатируемых судов свелась к оценке профицита или дефицита энергоэффективности, а для новых судов предстояло оценить горизонты снижения выбросов парниковых газов.

В апреле 2008 г. на 57-й сессии Marine Environment Protection Committee (MEPC – Комитет по защите морской среды (КЗМС)) была определена основная цель технических мер, состоящая в улучшении энергетической эффективности строящихся судов путем внедрения требований по конструктивному индексу CO_2 . Впервые в Японии в документе (MEPC 57/4/12) была представлена расчетная формула для определения величины конструктивного индекса CO_2 , который имеет размерность $\text{г} \cdot \text{CO}_2 / \text{т} \cdot \text{миля}$:

$$\text{Attained design CO}_2 \text{ index} = \frac{C_f \cdot \text{SFC} \cdot P}{\text{Capacity} \cdot V_{\text{ref}}},$$

где P – номинальная мощность главного двигателя, кВт; SFC – удельный эффективный расход топлива этого двигателя, $\text{г/кВт} \cdot \text{ч}$; C_f – безразмерный переводной коэффициент, $\text{г} \text{CO}_2 / \text{г}$ топлива, определенный по содержанию углерода в конкретном топливе. В знаменателе формулы – произведение величины вместимости судна Capacity в т (в качестве вместимости предполагалось принимать дедвейт) и максимальной скорости судна V_{ref} , миль/ч.

На 59-й сессии КЗМС, которая проходила с 13 по 17 июля 2009 г. в штаб-квартире ИМО в Лондоне, одним из наиболее значимых вопросов повестки дня был вопрос об ограничении выбросов парниковых газов. На этой сессии комитет одобрил введение вместо конструктивного индекса CO_2 нового конструктивного коэффициента энергетической эффективности (ККЭЭ) – (*Energy Efficiency Design Index – EEDI*), а также проект Временного руководства по методу расчета ККЭЭ для новых судов (MEPC.1/Circ.681) при их проектировании. Кроме того, были предложены механизмы реализации проектными и эксплуатирующими организациями оценки ККЭЭ в следующих документах:

- Временном руководстве для добровольного удостоверения ККЭЭ (MEPC.1/Circ.682);
- Руководстве по разработке плана по управлению энергетической эффективностью судна (MEPC.1/Circ.683) – в судовом плане энергетической эффективности (*Ship Energy Efficiency Management Plan – ПУЭЭС*);
- Руководстве по добровольному использованию индикатора эксплуатационной эффективности (MEPC.1/Circ.684).

Изменение названия основного показателя энергетической эффективности судна связано с введением в его расчетную формулу новых параметров, в том числе показателя применения технологий использования энергии отходящего тепла.

Коэффициент ККЭЭ сочетает в оценке энергоэффективности судов выбросы вредных веществ и объемы перевозок ($\text{г} \text{CO}_2 / \text{т} \cdot \text{миля}$), которая оценивается по формуле (1) в виде

$$\begin{aligned} EEDI = & \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{MEi} C_{FMEi} \text{SFC}_{MEi} \right) + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot \text{SFC}_{AE}^*}{f_i \cdot \text{Capacity} \cdot V_{\text{ref}} \cdot f_w} + \\ & + \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(0)} - \sum_{i=1}^{n_{WHR}} P_{WHRi} \right) C_{FAE} \text{SFC}_{AE} - \left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} P_{eff} C_{eff} \text{SFC}_{MEi} \right)}{f_i \cdot \text{Capacity} \cdot V_{\text{ref}} \cdot f_w}, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_{ref} – скорость судна; Capacity – водоизмещение судна; f_p, f_j, f_w – факторы, учитывающие влияние водоизмещения, особенностей конструкции и условий волнения и ветра соответственно; P_{MEi} – рас-

четная мощность главного двигателя, равная 75 % от его номинальной мощности за вычетом мощности, потребляемой валогенератором (в случае его наличия); P_{AE} – расчетная мощность вспомогательных двигателей; $P_{PT(0)}$ – мощность, равная 75 % от номинальной мощности, потребляемой каждым гребным электромотором без учета механических потерь. (Этот показатель должен учитываться тогда, когда имеет место гибридная пропульсивная установка с комбинированным приводом на винт); P_{WHR} – электрическая мощность в результате утилизации тепла главных двигателей; SFC_{AE} – удельный эффективный расход топлива главными и вспомогательными двигателями; C_{FMEi} , C_{FAEi} – выбросы CO_2 главными и вспомогательными двигателями; f_{eff} – коэффициент эффективности инновационных технологий получения энергии; P_{eff} – мощность, развиваемая в результате применения инновационных технологий получения энергии; C_{eff} – выбросы CO_2 в результате применения инновационных технологий получения энергии.

SFC_{ME} – удельный эффективный расход топлива, определяемый на основе универсальных характеристик. Типы и параметры главных двигателей были получены из базы данных Регистра Ллойда (Lloyds Register IHS Fairplay (LRFP) – база данных Регистра Ллойда (БДРЛ)) в соответствии с Международным стандартом ИСО 3046-1 с учетом допуска +5 %.

$P_{PT(0)}$ – мощность, рассчитываемая исходя из предположения и регрессионного анализа данных. В случае, если судно оборудовано винтом регулируемого шага (ВРШ), предполагается, что существует устройство для передачи механической мощности от главного двигателя к ВРШ, подключенное к линии вала или редуктора. Параметры устройства были приняты по оценкам на основе конкретных данных, зависящих от типа судна в виде регрессионных кривых. Если судно оборудовано винтом фиксированного шага, предполагается, что этого устройства не существует.

Поправочный коэффициент мощности f_i является коэффициентом использования установленной мощности при любых нормативных ограничениях по мощности и принимается равным 1,0. Для судов ледового класса он определяется в соответствии с данными табл. 1.

Таблица 1

Поправочный коэффициент мощности f_i для судов ледового класса

Тип судна	f_i	Limits depending on the ice class – Ограничения в зависимости от ледового класса судна			
		IC	IB	IA	IA Super
Танкер	$\frac{0,00115L_{PP}^{3,36}}{capacity}$	$\begin{cases} \max 1,33L_{PP}^{-0,07} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1,54L_{PP}^{-0,07} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1,80L_{PP}^{-0,09} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 2,10L_{PP}^{-0,11} \\ \min 1,0 \end{cases}$
Сухогрузное судно	$\frac{0,000665L_{PP}^{3,44}}{capacity}$	$\begin{cases} \max 1,33L_{PP}^{-0,05} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1,33L_{PP}^{-0,07} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1,80L_{PP}^{-0,09} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 2,10L_{PP}^{-0,11} \\ \min 1,0 \end{cases}$
Перевозчик генерального груза	$\frac{0,000676L_{PP}^{3,44}}{capacity}$	1,0	$\begin{cases} \max 1,08 \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1,12 \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1,25 \\ \min 1,0 \end{cases}$
Контейнеровоз	$\frac{0,1749L_{PP}^{2,29}}{capacity}$	1,0	$\begin{cases} \max 1,25L_{PP}^{-0,04} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1,60L_{PP}^{-0,08} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 2,10L_{PP}^{-0,12} \\ \min 1,0 \end{cases}$
Газовоз	$\frac{0,1749L_{PP}^{2,33}}{capacity}$	$\begin{cases} \max 1,25L_{PP}^{-0,04} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 1,60L_{PP}^{-0,08} \\ \min 1,0 \end{cases}$	$\begin{cases} \max 2,10L_{PP}^{-0,12} \\ \min 1,0 \end{cases}$	1,0

Одним из отличий формулы (1) является введение показателя требуемой мощности вспомогательных двигателей для обеспечения электроэнергии при максимальной загрузке судна – P_{AE} .

Этот показатель является функцией от установленной мощности MCR главного двигателя для двух случаев:

$$MCR > 10000 \text{ кВт}, P_{AE} = 2,5 \% MCR + 250;$$

$$MCR < 10000 \text{ кВт}, P_{AE} = 5 \% MCR.$$

Если полученное таким образом значение P_{AE} будет существенно отличаться от полной мощности вспомогательных двигателей, необходимой для нормальной эксплуатации судна, то этот показатель должен быть принят на основании таблицы нагрузок судовой электростанции.

C_F соответствует топливу, используемому при определении SFC , указанному в соответствующем сертификате EIAPP (Ship Energy Efficiency Operational Indicator – операционный показатель энергоэффективности). Значение C_F определяется в табл. 2.

Таблица 2

Определение C_F

Тип топлива	Ссылка	Содержание углерода	C_F г·CO ₂ /т топлива
1. Дизельное/ Газойль	ИСО 8217	0,875	3,206000
2. Легкое жидкое топливо (ЛЖТ)	ИСО 8217	0,86	3,151040
3. Тяжелое жидкое топливо (ТЖТ)	ИСО 8217	0,85	3,114400
4. Сжиженный нефтяной газ (СНГ)	Пропан	0,819	3,000000
	Бутан	0,827	3,030000
5. Сжиженный природный газ (СПГ)		0,75	2,750000
6. Метанол*		0,3750	1,375
7. Этанол*		0,5217	1,913

*Типы топлива, введенные Резолюцией МЕРС.245 (66).

КЗМС были определены следующие основные направления деятельности в области сокращения выбросов парниковых газов:

- ежегодная инвентаризация выбросов CO₂;
- анализ перспектив в области сокращения выбросов от судоходства;
- анализ технических и эксплуатационных мер по сокращению выбросов;
- анализ стратегических направлений по сокращению выбросов и план дальнейших действий;
- исследование влияния выбросов CO₂ от судоходства на глобальное потепление;
- сравнение энергетической эффективности судов и интенсивности выбросов CO₂ в зависимости от типа судов.

Круг рассматриваемых проблем группы КЗМС, одобренный на 60-й сессии МЕРС, проведенной 22 – 26 марта 2010 г., включал следующие вопросы:

- разработка необходимых руководств и методик расчета конструктивного коэффициента энергоэффективности (ККЭЭ) и базовой линии ККЭЭ;
- рассмотрение проекта инструмента ИМО по сокращению выбросов парниковых газов и повышению энергоэффективности судов;
- оценка применимости ККЭЭ для различных типов и размеров судов.
- оценка влияния повышения энергоэффективности судов на их безопасность.
- подготовка отчета для 61-й сессии МЕРС.

Группой были рассмотрены и подготовлены рекомендации МЕРС по корректировке уравнений расчета ККЭЭ, приведенных в циркулярах ИМО МЕРС.1/Circ.681 и МЕРС.1/Circ.682. Было

принято предложение проводить расчеты ККЭЭ для судов, перевозящих колесную технику с применением значений дедвейта судна, равных 65 %. Участники группы согласились с предложением ужесточить требования к энергоэффективности судов после вступления в силу соответствующего инструмента ИМО для поэтапного снижения выбросов парниковых газов в атмосферу.

Во Временном руководстве по методам расчета ККЭЭ была принята формула для расчета ККЭЭ в г-СО₂ / на тонну перевезенного груза на 1 милю, в которую в дальнейшем могут быть внесены поправки при рассмотрении окончательной редакции этого документа:

$$EEDI = \frac{\left(\sum_{j=1}^M f_j\right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{MEi} C_{FMEi} \cdot SFC_{MEi}\right) + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^*}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \frac{\sum_{j=1}^M f_j \left(\left(\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{nWHR} P_{WHRi}\right) C_{FAE} SFC_{AE} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff} P_{eff} C_{eff} SFC_{MEi}\right)\right)}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \quad (2)$$

Отличие формулы (1) от формулы (2), принятой на 58-й сессии КЗМС, заключается в следующем [5]:

- введение корректирующего фактора f_j , учитывающего специфическую конструкцию элементов судна, перед показателем P_{PTI} , учитывающим мощность, потребляемую каждым гребным электромотором при гибридной пропульсивной установке. f_j для ледового класса судов определяется стандартным f_j , приведенным в табл. 3, для других типов судов f_j следует принимать равным 1,0;

- замена показателя сокращения электрической энергии за счет использования отходящего тепла P_{WHR} показателем снижения мощности вспомогательных двигателей за счет применения эффективных инновационных технологий по использованию отходящего тепла из главного двигателя P_{AEeff} умноженным на коэффициент доступности инновационных технологий f_{eff}

Анализ значений ККЭЭ, расчет которых был выполнен рядом стран для различных типов и размеров судов, показал, что приведенные в руководстве ИМО уравнения расчета базовой линии ККЭЭ применимы с достаточной надежностью к сухогрузам и контейнеровозам дедвейтом более 5000 т, к танкерам, газовозам и рефрижераторным судам дедвейтом более 2000 т, а также к судам Ro-Ro дедвейтом более 15000 т.

Группой были подготовлены для рассмотрения на 61-й сессии МЕРС, проведение которой было запланировано на октябрь 2010 г., проекты следующих руководств:

- расчет базовой линии для расчетного ККЭЭ;
- учет электрических нагрузок при расчете ККЭЭ;
- подтверждение расчетного ККЭЭ нового судна.

В то же время на состоявшейся 5 октября 2009 г. в Гамбурге Второй Международной конференции «Ship efficiency» была поставлена под сомнение эффективность внедрения ККЭЭ для снижения выброса парниковых газов.

Таблица 3

Поправочный коэффициент мощности f_j для судов ледового класса

Тип судна	f_i	Ограничения в зависимости от ледового класса судна			
		IC	IB	IA	IA Super
Танкер	$\frac{0,516 L_{PP}^{1,87}}{capacity}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,72 L_{PP}^{0,06} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,61 L_{PP}^{0,08} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,50 L_{PP}^{0,10} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,40 L_{PP}^{0,12} \end{cases}$
Сухогрузное судно	$\begin{cases} \frac{2,15 L_{PP}^{1,58}}{capacity} \\ \frac{0,0450 L_{PP}^{2,37}}{capacity} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,89 L_{PP}^{0,02} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,78 L_{PP}^{0,04} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,68 L_{PP}^{0,06} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,58 L_{PP}^{0,08} \end{cases}$
Перевозчик генерального груза	$\frac{0,0450 L_{PP}^{2,37}}{capacity}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,85 L_{PP}^{0,03} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,70 L_{PP}^{0,06} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,54 L_{PP}^{0,10} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{макс } 1,0 \\ \text{мин } 0,39 L_{PP}^{0,15} \end{cases}$

В частности, на основании расчетов, выполненных самостоятельно [6] и по инициативе European Maritime Safety Agency (EMSA – Европейское агентство морской безопасности) [7], возникли предположения о том, что развернутая в настоящее время деятельность ИМО, предполагающая внедрение ККЭЭ, только увеличит выбросы CO_2 с судов, поскольку коэффициент имеет серьезные недостатки, способные затормозить технический прогресс путем значительного ограничения возможностей оптимизации при проектировании судна. EMSA напомнило также о том, что эмиссия CO_2 пропорциональна расходу топлива, предложив решать проблему путем корректировки цен на топливо, а не введением ККЭЭ.

Фирмой «Deltamarin Ltd» (Дания) по поручению КЗМС были выполнены поверочные исследования [8] применимости ККЭЭ для судов различного типа, участники которых исходили из того, что основной целью внедрения ККЭЭ является сокращение глобальных выбросов CO_2 , не создавая препятствие конкуренции или не ограничивая торговые отношения. Поскольку ККЭЭ распространяется и на суда, совершающие короткие перевозки, особенно типа Ro-Ro и Ro-Pax, существует риск воздействия основных конструктивных параметров этих типов судов на ККЭЭ таким образом, что будущие проекты судов будет крайне сложно или даже невозможно завершить. Перед предстоящими исследованиями ставились следующие задачи, позволяющие выяснить, какие изменения или корректировки необходимо внести для широкого применения методологии ККЭЭ.

1. Уточнение формулы ККЭЭ для Ro-Ro и Ro-Pax судов:

- определить возможные коррекции факторов, включаемых в формулу (1);
- оценить текущий базовый подход и различные представленные материалы ИМО о принципах расчета базовой линии и ККЭЭ;
- уточнить или скорректировать базовые ККЭЭ.

В случае необходимости проведение оценки, разработка методологии и альтернативного подхода к потенциалу сокращения выбросов CO_2 .

2. Разработка методологии для решения проблем энергоэффективности с целью разрешения строительства новых судов:

- определить возможные суда, не подпадающие в настоящее время под требуемые ККЭЭ;
- определить корректирующие факторы и исходные данные, позволяющие включить конкретные типы судов в сферу применимости ККЭЭ;
- разработать альтернативный способ повышения энергетической эффективности на этапе проектирования для специально построенных судов.

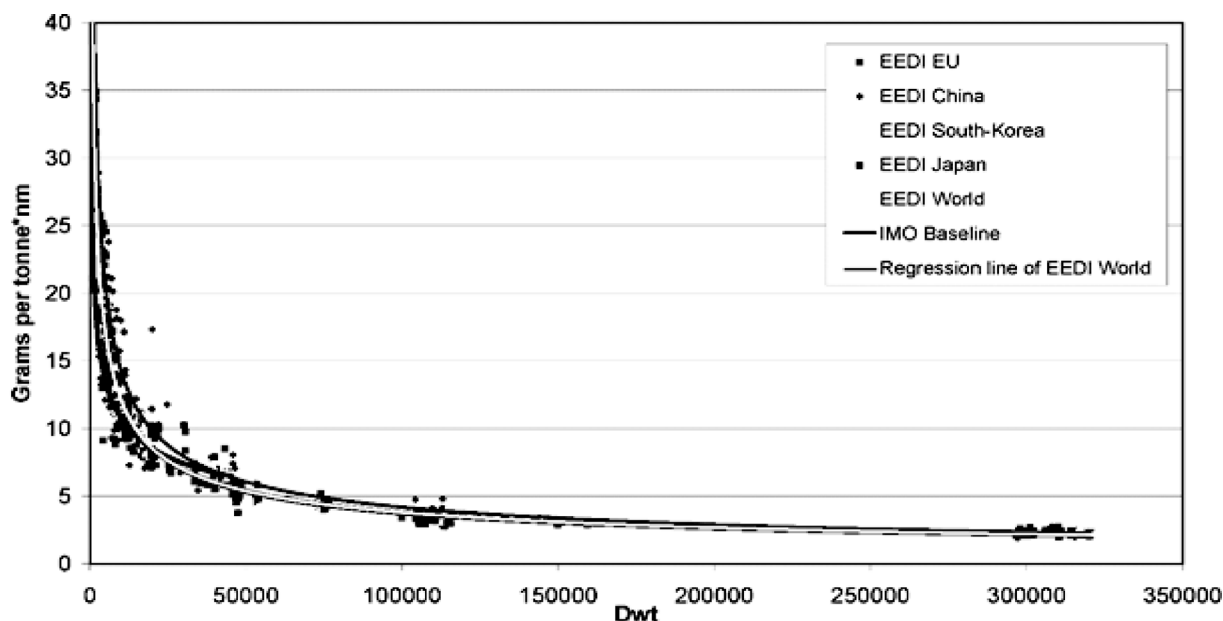
Оценке подверглись суда следующих типов: танкеры, перевалочные суда, сухогрузные суда, контейнеровозы, перевозчики генерального груза, газовозы, пассажирские суда, накатные пассажирские суда, накатные суда для перевозки транспорта, накатные суда с дедвейтом в виде линейного метра менее 4 т/м, накатные суда с дедвейтом в виде линейного метра, равного или более 4 т/м.

В табл. 4 и на рисунке приведены примеры расчета и построения базовой линии для танкеров, включая данные выборки судов по регионам мира, их количество, средние значения дедвейта, длительной мощности ИСО, скорости движения и ККЭЭ [8].

Таблица 4

Танкеры

Параметры	Европа	Китай	Южная Корея	Япония	В целом
Объем выборки, шт.	53	445	826	401	1725
Средний дедвейт, т	20783,98	57779,20	74099,74	66675,50	66525,54
Средняя длительная мощность, кВт	5968,34	7826,42	10048,46	8785,33	9056,25
Средняя скорость, мм/ч-узлы	14,31	13,59	14,75	14,58	14,40
Средний ККЭЭ, г/т мм	9,99	9,986	6,56	8,848	8,08
Среднее отклонение от базовой линии	–3,06	–1,55	–0,79	–1,60	–1,24



Расчет ККЭЭ для танкеров

Выполненные расчеты показали, что корреляция вполне пригодна для всех типов судов, за исключением газовозов до 20 000 DWT и накатных судов для перевозки транспорта свыше 10 000 DWT. В настоящем виде ККЭЭ непригоден для регулирования энергетической эффективности газовозов и для накатных судов для перевозки транспорта.

В Резолюции МЕРС.231(65) [7] КЗМС принял проект постановления о внесении изменений в правила расчета базовых линий для использования ККЭЭ. С целью расширения его применения для газовозов и различных типов Ro-Ro были приняты следующие решения:

- утвердить Руководство для расчета базовых линий и использования ККЭЭ так, как это изложено в приложении к резолюции;
- признать необходимость дальнейшего пересмотра этого Руководства с учетом накопленного опыта;
- отменить данное Руководство для расчета базовых линий и использования ККЭЭ, принятое Резолюцией МЕРС.215(63).

КЗМС согласовал следующие новые документы: «Руководящие принципы для расчета базовых линий для использования с ККЭЭ», содержащиеся в прил. VI к МАРПОЛ, гл. 4. Согласованные изменения в регламенте включают дополнительно два типа судов для обязательного применения ККЭЭ: накатные и пассажирские суда, кроме ранее согласованных: сухогрузов, газовозов, танкеров, контейнеровозов, перевозчиков генерального груза, рефрижераторных судов, накатных судов и перевозчиков СПГ. Здесь же вводится корректирующий коэффициент при расчете достигнутого ККЭЭ для судов – перевозчиков генеральных грузов.

Данный метод расчета базовых линий не распространяется на пассажирские суда, кроме пассажирских круизных судов, имеющих нетрадиционные способы движения.

КЗМС в Резолюции МЕРС.245 (66) [9] принял проект постановления об уточнении правил расчета базовых линий ККЭЭ и отмене Руководства 2012 г. по методу вычисления фактического ККЭЭ для новых судов (Резолюция МЕРС.212(63) с поправками, внесенными Резолюцией МЕРС.224(64).

Источником базы данных для расчета базовой линии ККЭЭ является база данных, выбираемая в качестве стандартной и заархивированная по согласованию между Секретариатом КЗМС и БДРЛ.

Для расчета базовых линий используются следующие исходные данные:

- параметр *Capacity* для каждого типа судна согласно МЕРС.212 (63);
- расчетная скорость судна V_{ref} ;
- мощность главных двигателей MCR_{ME}
- (для некоторых судов отдельные записи в базе данных могут быть нулевыми);
- выбросы CO_2 главными и вспомогательными двигателями: $C_{F,ME} = C_{F,AE} = C_F = 3,1144 \text{ г} \cdot CO_2 / \text{т}$

топлива;

- удельный эффективный расход топлива, одинаковый для всех типов главных двигателей $SFC = 190 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$;

- установленная мощность главных двигателей $P_{ME(i)} = 0,75 MCR_{ME(i)}$;

- мощность вспомогательных двигателей P_{AE} определяемая в соответствии с пп. 2.5.6.1 и 2.5.6.2 приложения к МЕРС.212(63);

- для пассажирских судов Ro-Ro $P_{AE} = 0,866 \cdot GT^{0,732}$.

Поправочные коэффициенты не применяются за исключением f_{jRo-Ro} и f_{cRoPax} . Инновационные механические технологии эффективного использования энергии, валогенераторы и другие инновационные энергосберегающие технологии исключены из расчета базовой линии, т. е. $P_{AEff} = 0$, $P_{PTI} = 0$, $P_{eff} = 0$.

Уравнение для расчета оценочных значений индекса для каждого из судов, за исключением судов-контейнеровозов и грузовых судов Ro-Ro, имеет следующий вид:

$$\text{Value Index Estimated} = 3,1144 \cdot \frac{190 \cdot \sum_{i=1}^{nME} P_{MEi} + 215 \cdot P_{AE}}{\text{Capacity} \cdot V_{ref}}. \quad (3)$$

Для контейнеровозов, 70 % DWT которых используется в качестве водоизмещения, уравнение для расчета оценочных значения индекса для каждого контейнеровоза имеет следующий вид:

$$\text{Value Index Estimated} = 3,1144 \cdot \frac{190 \cdot \sum_{i=1}^{nME} P_{MEi} + 215 \cdot P_{AE}}{70\% DWT \cdot V_{ref}}. \quad (4)$$

Для судов типа Ro-Ro (транспорт) уравнение для расчета оценочных значения индекса для каждого контейнеровоза имеет следующий вид:

$$\text{Value Index Estimated} = f_{RoRoV} \cdot 3,1144 \cdot \frac{190 \cdot \sum_{i=1}^{nME} P_{MEi} + 215 \cdot P_{AE}}{\text{Capacity} \cdot V_{ref}}, \quad (5)$$

где $f_{RoRoV} = (-15571 \cdot F_n^2 + 5538,4 F_n - 132,67) / 271$.

Для грузовых судов типа Ro-Ro уравнение для расчета оценочных значения индекса для каждого контейнеровоза имеет следующий вид:

$$\text{Value Index Estimated} = \frac{3,1144 \left(f_{jRoRo} \cdot 190 \cdot \sum_{i=1}^{(nME)} P_{MEi} + 215 P_{AE} \right)}{f_{cRoPax} \cdot \text{Capacity} \cdot V_{ref}}. \quad (6)$$

В ответ на запросы по применению методологии расчетов, содержащихся в руководящем положении ИМО, фирма «BIMCO» создала EEDI-калькулятор [10], позволяющий с легкостью определить изменения в ККЭЭ при изменении проектных параметров. Панель управления калькулятора позволяет обеспечить:

- ввод исходных данных по судну (*Input sheet*);
- построение графических изображений в виде базовых линий и определение точек ККЭЭ (*Plot sheet*);
- формирование листа параметров (*Parameter list*);
- изучение инструкции по применению калькулятора (*How-to*);
- перечень версий калькулятора и их особенности (*Release notes*).

Следует отметить, что по мере совершенствования руководящих документов по методам вычисления ККЭЭ калькулятор прошел несколько стадий обновления и пригоден для выполнения актуальных расчетов.

Выводы

1. Формирование понятия «конструктивный коэффициент энергетической эффективности судна – ККЭЭ» происходило в течение длительного периода времени, во время которого удалось преодолеть существенные противоречия в его понимании и оценке.
2. Объективная оценка уровня выбросов парниковых газов с судов различного типа и назначения определяется путем учета различного рода факторов и введения поправочных коэффициентов, а также оценки влияния отдельных конструктивных параметров на величину ККЭЭ.
3. В настоящее время сформировались особенности и методы аналитической оценки и расчета ККЭЭ для различных типов судов.

Список литературы

1. Energy Efficiency related Rules and Regulations — EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulations [Электронный ресурс] / Mia Elg. — 2014. — 55 с. — Режим доступа: URL: http://laradi.fi/images/files/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf (дата обращения: 10.11.2014).
2. Fournier A. Controlling Air Emission from Marine Vessels: Problems and Opportunities [Электронный ресурс] / A. Fournier. — University of California Santa Barbara. — 2006. — 91 с. — Режим доступа: URL: <http://www.ourair.org/itg/past-activities> (дата обращения: 12.10.2012).
3. Anink D. The IMO Energy Efficiency Design Index. A Netherlands Trend Study. Centre for Maritime Technology and Innovation / D. Anink, M. Krikke. — 2009. — 52 с.
4. Boletis E. Integrated Propulsion Systems. The CIMAC Circle at the 2012 SMM [Электронный ресурс] / E. Boletis. — 2012. — 34 с. — Режим доступа: URL: http://www.cimac.com/congress_events/events-1.asp (дата обращения: 12.10.2012).
5. Гришкин В. В. О деятельности в области сокращения выбросов парниковых газов с судов / В. В. Гришкин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 34. — С. 153–166.
6. IMO (2010a). Reduction of Green House Gas emissions from Ships, Report of the Working Group on Energy Efficiency Measures for Ships, Paper MEPC 61/WP.10. — International Maritime Organization, London, United Kingdom.
7. Deltamarin Ltd. Study on tests and trials of the Energy Efficiency Design Index as developed by the IMO. Deltamarin EEDI Study for EMSA – Final Report.docx [Электронный ресурс]. — 2011. — 159 с. — Raisio, Finland. — Режим доступа: URL: <http://emsa.europa.eu/implementation-tasks/environment/items/id/1310.html?cid=96> (дата обращения: 09.09.2013).
8. 2013 Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI) Resolution MEPC., Annex 14 [Электронный ресурс]. — 2013. — № 231 (65) — 12 с. — Режим доступа: www.bimco.org/News/2013/05/17_Updated_EEDICalc.aspx?RenderSearch=true/ (дата обращения: 09.09.2013).
9. 2014 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC 66/21/Add 1 Annex 5, MEPC [Электронный ресурс]. — 2015. — 245 (66). — 30 с. — Режим доступа: URL: www.schonescheepvaart.nl/downloads/regelgeving/doc_1400076573.pdf (дата обращения: 02.02.2015).
10. BIMCO EEDI Calculator. EEDI Calculator (xls format) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: www.bimco.org/en/Products/EEDI.aspx (дата обращения: 23.01.2012).

УДК 62.2+ 67.05+67.02+629.5.03

С. А. Кулаченко,
асп.;

С. Н. Безпальчук,
инж.;

Е. Н. Белецкий,
гл. технолог

ПЕРСПЕКТИВЫ СПОСОБА МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

PROSPECTS THE WAY MAGNETORHEOLOGICAL POLISHING RESPONSIBLE PARTS OF FUEL EQUIPMENT OF SHIP ENGINE

В статье рассмотрен новый подход к механической финишной обработке, представляющий собой магнитно-реологическое полирование свободным абразивом внутренних и внешних поверхностей ответственных деталей топливной аппаратуры судовых дизелей. Представлены различные варианты магнитных жидкостей, проведен сравнительный анализ нескольких вариантов составов, рассмотрено влияние олигомерных матриц на физические и химические свойства рабочих жидкостей. Предложен новый комплексный подход исследований, который включает выбор методик и алгоритмов испытаний, этап подготовки составов магнитно-реологических жидкостей, адаптированных к конкретному случаю механической обработки, этап выбора стендов трения, выбора средств инструментальной оценки, измерительно-вычислительных комплексов и методик обработки данных. Получены новые данные по температуре в зоне работы магнитно-реологических жидкостей, а также наибольшие диаметры пятен контакта образцов, которые позволяют оценивать наиболее эффективные составы жидкостей по производительности процесса механической обработки.

The article describes a new approach to mechanical finishing, representing a magneto - rheological polishing free abrasive inner and outer surfaces of critical parts of fuel equipment of diesel engines for ships. Features various kinds of magnetic fluids. A comparative analysis of several variants of compositions and the effect of oligomeric matrices on the physical and chemical properties of working fluids. We propose a new integrated approach of research, which includes: choice of methods and algorithms of tests, the preparation of the compositions of the magnetic rheological liquids adapted to the specific case of machining, the selection stage stands friction, the choice of instrumental evaluation, measuring and computing complexes and methods of data processing. New data on the temperature in the vicinity of the magnetic rheological fluids and largest diameters of contact spots of the samples, which allows to evaluate the most effective composition of fluids on the performance of the machining process

Ключевые слова: магнитные жидкости, порошки металлов, механическая обработка, испытательные стенды, инструментальный мониторинг.

Key words: magnetic liquids, powders of metals, machining, test stands, tool monitoring.



ФИНИШНЫЕ операции обработки прецизионных поверхностей контактирующих деталей широко используются при изготовлении отдельных узлов топливной аппаратуры судовых дизелей, таких как толкатели в блоках топливного насоса, плунжерные пары, запорные иглы в распылителях. В настоящее время широко применяют операции доводки, хонингования и суперфиниша. Однако они не обладают достаточной производительностью, а также не удовлетворяют возросшим требованиям к точности обработки и низкой шероховатости (по параметру Ra 0,32...0,08 мкм). Поэтому поиск альтернативных технологий финишной обработки является актуальной задачей современного судового двигателестроения.

Для получения качественных функциональных поверхностей с низкой шероховатостью и снижения их себестоимости создаются новые методы обработки [1] – [3]. Так, одним из новых ме-

тодов является магнитореологическое полирование (*МРП*). Данную технологию можно отнести к методам магнитно-абразивной обработки (*МАО*), т. е. обработки, осуществляемой при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле [4]. Сущность *МАО* заключается в том, что рабочая среда, состоящая из ферромагнитных, абразивных частиц и смазочно-охлаждающей технологической жидкости (*СОЖ*) прижимается к обрабатываемой поверхности заготовки с помощью магнитного поля индуктора. В результате этого процесса происходит проникание абразивных зерен в обрабатываемую поверхность. Для интенсификации съема материала с поверхности заготовки производят возвратно поступательное перемещение заготовки относительно магнитного индуктора. Технологические возможности *МАО* соответствуют значениям Ra 0,02...0,06 мкм [4], [5].

Для обеспечения технологичности и высоких требований к обрабатываемой поверхности в качестве рабочей среды были применены магнитно-реологические суспензии (*МРС*), представляющие собой жидкости и пасты с довольно продолжительным периодом нахождения в гомогенном состоянии (до нескольких суток). Также в *МРС* вводят различные добавки: абразивные материалы (искусственные алмазы, оксид церкония и т.д.), поверхностно-активные вещества (*ПАВ*), антиокислители, смачиватели и т. д. Относительно низкая вязкость в отсутствии магнитного поля позволяет равномерно распределить вводимые добавки по объему суспензии. Благодаря «текучести», *МРС* можно более интенсивно подводить к обрабатываемой поверхности, отводить на очистку и возвращать в технологический цикл. Приведенные технологические особенности положительно сказываются на качестве обрабатываемой поверхности. Технология позволяет обрабатывать с прецизионной точностью образующие прилегающих поверхностей запорных иголок, форсунки распылителя, наружные и внутренние диаметры плунжерной пары, седла клапанов и подобные конструкции деталей пар трения.

В настоящее время во всем мире существует большое количество статей и патентов по *МРП* [1] – [6]. Основные публикации сосредоточены на разработке технологической базы для обработки оптических поверхностей (стекол, оптических кристаллов, полимерных линз и т. д.) и кремниевых подложек микросхем. Также публикуются сведения по микропрофилированию (снятию микрозаусенцев) изделий микроэлектроники и изделий сложной формы из различных. Ведутся работы по применению метода *МАП* в медицине для полировки искусственных суставов. Предложено довольно большое количество рецептур *МРС* с различными добавками (абразивные, антиоксиданты, *ПАВ*, смачиватели и т. д.) [5], [6]. Добавки и модификаторы в *МРС* позволяют существенно расширить спектр их применения.

Первые научные исследования, проведенные в 60-е гг. XX в., позволили установить, что неотъемлемой характеристикой магнитных материалов является твердость. Однако более поздние исследования показали, что существующие гомогенные жидкости действительно обладают слабыми магнитными свойствами. К таким жидкостям относятся водные растворы парамагнитных солей некоторых элементов (железа, марганца, гольмия), причем их магнитные параметры настолько малы, что о промышленном применении магнитных свойств этих жидкостей не может быть и речи. Растущий спрос и потребности современной техники привели к появлению новых жидких магнитных материалов, обладающих свойствами текучести жидкостей и способностью взаимодействовать с магнитным полем как твердое тело.

Магнитные жидкости представляют собой устойчивую высокодисперсную систему лиофобного типа с высокой степенью лиофилизации стабилизированных частиц магнитного материала в дисперсной среде и уникальны тем, что высокая текучесть сочетается в них с высокой намагниченностью, в десятки тысяч раз большей, чем у обычных жидкостей. Секрет такой высокой намагниченности заключается в том, что в жидкость введен высокодисперсный магнитомягкий материал, покрытый тонкой (мономолекулярной) оболочкой стабилизатора, препятствующей агрегации (слипанию) магнитных частиц. Поэтому в отличие от обычных суспензий, частицы в магнитных жидкостях не седиментируются, в результате чего могут сохранять свои рабочие характеристики в течение многих лет. Если увеличить концентрацию и размер частиц магнитного

материала, то механизм стабилизации такой жидкости изменится от адсорбционно-сольватного и электростатического до структурно-механического и гидродинамического, т. е. стабилизация таких систем будет происходить из-за высокой концентрации магнитных частиц и высокой вязкости всей дисперсной системы. Такие концентрированные «магнитные жидкости» получили название *магнитно-реологические жидкости (МРЖ)*.

Свойства МРЖ определяются совокупностью входящих в них компонентов (твердой магнитной фазы, дисперсионной среды и стабилизатора), варьируя которые можно изменять их физико-химические параметры в зависимости от условий применения. Одним из отличительных свойств магнитных жидкостей является изменение комплексной вязкости МРЖ в зависимости от величины приложенного магнитного поля (рис. 1), а также достаточная абразивная способность самих частиц, которые выполняют роль свободного абразива, позволяющего снимать слой материала заготовки и задавать шероховатость согласно требованиям чертежа [6], [7].

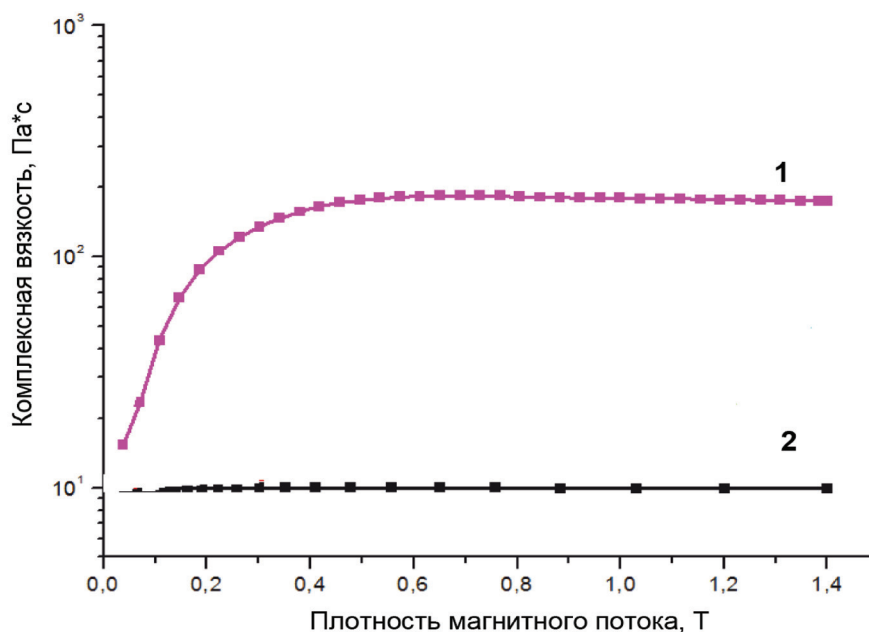


Рис. 1. Зависимость комплексной вязкости от плотности магнитного потока:
1 – магнитная жидкость; 2 – жидкая основа

В результате испытаний МРЖ необходимо было решить следующие задачи.

1. Определить состав МРЖ и их триботехнические характеристики применительно к задачам машиностроения и процессам финишной механообработки свободным абразивом.
2. Выбрать методики и алгоритмы испытаний.
3. Выбрать стенд для испытаний (стенды и машины трения по своим характеристикам, близкие к процессам разрушения с использованием схемы, предложенной проф. И. В. Крагельским (рис. 2) [8]).
4. Выбрать приборы и методы инструментальной оценки поверхностей трения образцов и технологических сред (МРЖ).

Эксплуатационные характеристики МРЖ определяются входящими в их состав компонентами. Так, жидкую основу подбирают из расчета химической стойкости, температуры эксплуатации, наличия специфических свойств и т. д. Для создания МРЖ, использующихся в уплотнениях валов мешалок аппаратов, работающих под вакуумом, необходимым свойством жидкой основы является низкое давление паров при рабочей температуре. В узлах трения, где МРЖ используется в виде смазки, необходимы антифрикционные характеристики. В технологических системах в качестве рабочей среды используются максимальные фрикционные характеристики и абразивные свойства, достаточные для осуществления процесса резания и удаления слоя обрабатываемого материала.

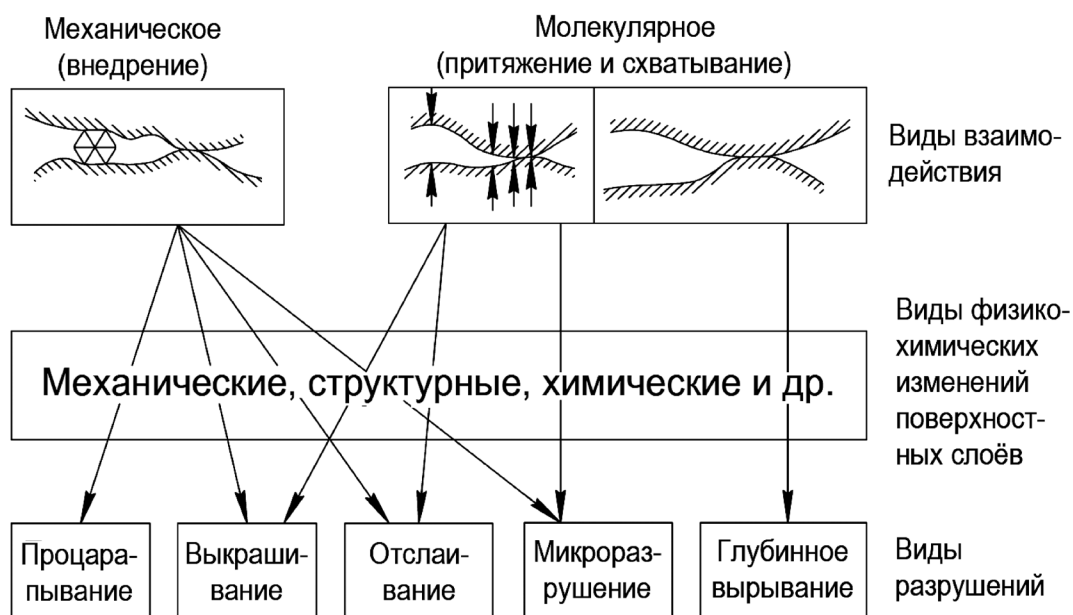


Рис. 2. Классификация видов разрушения поверхностных слоев по И. В. Крагельскому

Выбор магнитного материала определяется необходимыми магнитными характеристиками, дисперсностью, химической стойкостью, а также, в некотором роде, его совместимостью с жидкой основой [9]. Стабилизатор, служащий для предотвращения агрегации магнитного материала и совмещения его с жидкой основой подбирается из расчета, чтобы одна часть его молекулы была совместима с жидкой основой, а другая образовывала связь с поверхностью частицы магнитного материала. Одним из наиболее распространенных стабилизаторов являются *ПАВ*, в частности, органические жирные кислоты и их соли, при этом взаимодействие с поверхностью частицы магнитного материала носит ионный характер. Однако при таком взаимодействии молекулы *ПАВ* постоянно сорбируются и десорбируются с поверхности, что приводит к появлению на ней вакантных мест, которые могут быть заняты присутствующими в жидкой основе примесями. В конечном итоге, такие взаимодействия приводят к изменению рабочих характеристик магнитной жидкости.

Исходя из особых физико-химических свойств магнитно-реологических жидкостей, был предложен способ стабилизации магнитных частиц, заключающийся в образовании ковалентной связи между поверхностными атомами магнитной частицы и молекулой стабилизатора. В качестве магнитного материала было выбрано железо карбонильное радиотехническое марки Р-10, ГОСТ 13610-79, что, в первую очередь, связано с его великолепными магнитными свойствами и достаточной абразивной способностью по отношению к обрабатываемому материалу.

На основе этой технологии были получены *МРЖ* на базе ВМ-4 – масло вакуумное ТУ 38.401-58-3-90, УПИ – смазка (перфторированный углеводород) ТУ 95-2289. Данные по специально подготовленным составам *МРЖ* с различным процентным содержанием в них магнитного материала и результаты испытаний приведены далее.

Состав: основа + железо карбонильное Р-10:

№ 1: массовое содержание железа 80 %, основа ВМ-4;

№ 2: массовое содержание железа 59 %, основа ВМ-4;

№ 3: массовое содержание железа 84 %, основа ВМ-4;

№ 4: массовое содержание железа 56 %, основа УПИ.

Состав: ВМ-4 + железо карбонильное Р-10, модифицированное перфторированным прекурсором.

№ 3 (Fe-S60Cl): массовое содержание железа: 83 %, основа ВМ-4.

В качестве основы были использованы:

ВМ-4 – масло вакуумное ТУ 38.401-58-3-90 (изм. 1-6);

УПИ – смазка (перфторированный углеводород) ТУ 95-2289.

Магнитный наполнитель – железо карбонильное радиотехническое марки Р-10, ГОСТ 13610-79.

Проведение натурных испытаний на реальных объектах новых разработанных технологических сред (ТС) является обычно трудоемким и дорогостоящим. Поэтому для определения рационального состава активных препаратов в этой среде или параметров качества поверхностного слоя материала заготовки на практике широко используют различные стенды и машины трения.

Для определения фрикционных свойств ТС без процесса резания чаще всего используют стандартные машины трения с точечным скользящим контактом образцов, позволяющих развивать более высокие удельные нагрузки, характерные для процесса резания, чем при линейном контакте ЧШМ-4 или ЧМТ-1. Максимальное давление в зоне контакта для этих машин может находиться в пределе 1500 ... 5000 МПа. В настоящее время широкое распространение получили четырехшариковые машины трения. Узел трения этих машин представляет собой пирамиду из четырех контактирующих друг с другом шариков диаметром 12,7 мм, изготовленных по первому классу из закаленной стали ШХ15. Верхний шарик, закрепленный во вращающемся шпинделе, прижимается с заданной нагрузкой к трем неподвижным нижним шарикам. Частота вращения шпинделя постоянна и, как правило, находится в пределах (1460 ± 70) об/мин. Длительность краткосрочных испытаний (10 ± 0,2) с. На четырехшариковой машине трения по стандартной методике определяют противоизносные, противозадирные и антифрикционные свойства жидких и пластичных смазочных материалов и технологических сред, находят критическую нагрузку P_k , нагрузку сваривания P_c , индекс задира I_z , а также показатель износа $D_{и}$.

Согласно принятой методике, критическая нагрузка P_k характеризует способность смазочных материалов предотвращать быстрое изнашивание трущихся поверхностей. Нагрузка сваривания P_c характеризует предельную работоспособность смазочного материала. Это наименьшая осевая нагрузка, вызывающая останов машины при достижении момента трения 1200 Н·м или сваривании шариков. Индекс задира I_z – безразмерная величина, которая определяется по величине износа шариков при различных нагрузках: от начальной до нагрузки сваривания. Показатель износа $D_{и}$, мм, определяется как средняя величина диаметра пятен износа нижних шариков при испытаниях в течение одного часа с постоянной нагрузкой, меньшей критической.

В качестве измерительных и аппаратных средств при проведении исследований МРЖ был использован измерительный комплекс на базе оптического микроскопа МБС-10 с теленасадкой и бесконтактный прибор оценки температуры по инфракрасному спектру модели INFRARED RTI-520, а также искусственная термopapa. Визуальный мониторинг поверхности образцов шариков осуществлялся с помощью измерительно-вычислительного комплекса на базе оптического микроскопа МБС-10 (рис. 3) с телевизионной приставкой – цифровая USB видеокамера Altami USB 3150R6 1/2CMOS. МБС-10 используют в различных областях естественных наук: археологии, биологии, зоологии, приборостроении, машиностроении и др. МБС-10 работает как в проходящем, так и в отражённом свете, на нём можно рассматривать как тонкие образцы, так и объёмные предметы, т.е. микроскоп МБС-10 является стереоскопическим. Для работы с микроскопом можно использовать как естественное освещение, так и встроенный осветитель. Изменение межзрачкового расстояния у стереомикроскопа МБС-10 составляет от 56 до 72 мм, округленные значения увеличений – 7-, 4-, 2-, 1- и 0,6-крат, объектив с фокусным расстоянием $f = 90$ мм, осветитель (лампа РН8-20-1), рабочее расстояние не менее 95 мм.

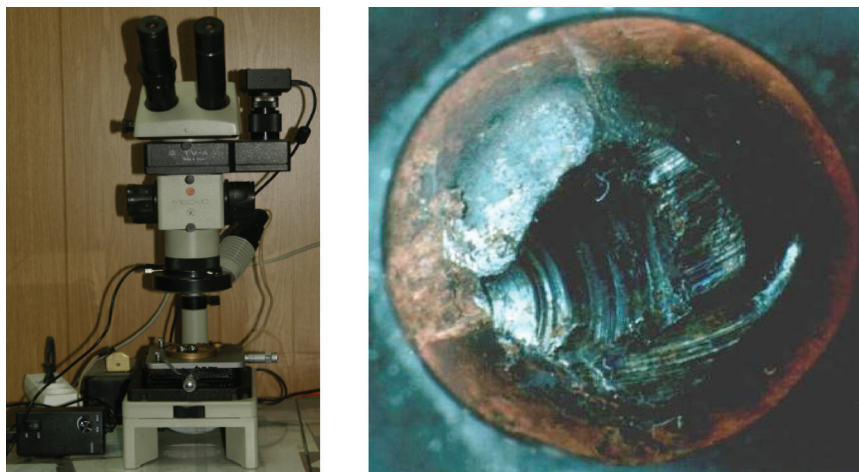


Рис. 3. Измерительно-вычислительный комплекс на базе оптического микроскопа МБС-10 с фотоадаптером TV-A и телевизионной приставкой

Используемая цифровая USB видеокамера Altami USB 3150R6 1/2CMOS на основе трёхмегапиксельной CMOS-матрицы с большим пикселем ($3,2 \times 3,2$ мкм) адаптирована к техническим измерениям. При максимальном разрешении 2048×1536 пикселей передача информации происходит со скоростью 6–10 кадров в секунду. Также доступны разрешения 1024×768 и 512×384 пикселей с много большей скоростью передачи изображения. Данные режимы можно использовать для точной фокусировки на объекте исследования, а затем, переключившись на максимальное разрешение, настраивать параметры изображения (баланс белого, экспозицию, яркость, насыщенность и др.). Цифровая USB видеокамера 3 MPix имеет оптимальные технические характеристики, необходимые для проведения качественной фотосъёмки на микроскопах даже исследовательского класса. Входящее в комплект программное обеспечение «Altami Studio» позволяет выводить на экран изображение исследуемого объекта в режиме реального времени, управлять всеми настройками камеры, процессом съёмки и проводить различные измерения как на статичном, так и на «живом» изображении.

Испытания проводились при максимальной нагрузке 5000 МПа в течение 60 мин. Результаты испытаний разных составов МРЖ приведены на рис. 4. Обработка данных экспериментов осуществлялась методом малой выборки по методикам, используемым в инженерных расчетах.

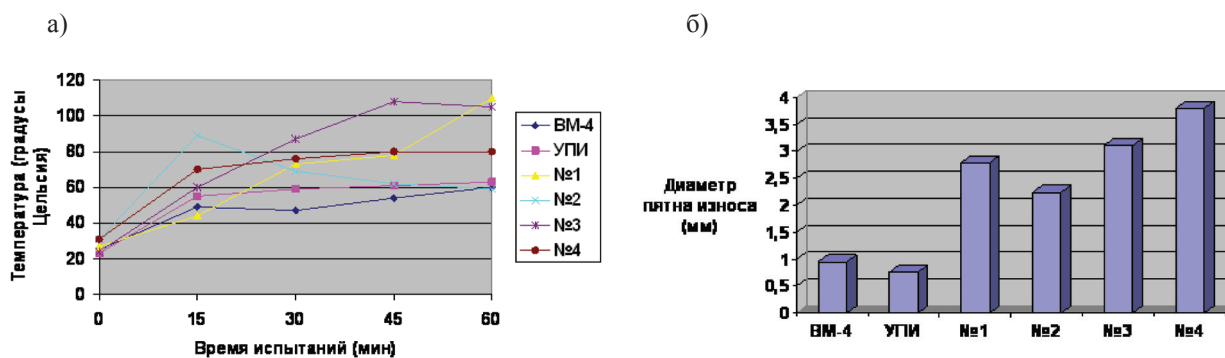


Рис. 4. Зависимость от состава МРЖ:

а – температуры в зоне контакта; б – диаметра пятна износа

На основе проведенных собственных испытаний, а также данных, изложенных в работе [10], можно сделать следующие выводы об абразивных способностях МРЖ:

– с увеличением концентрации магнитных частиц пропорционально увеличивается пятно контакта (характерно для основы ВМ-4);

– синтетическая основа УПИ даже при сравнительно небольших концентрациях магнитного порошка до 60 % приводит к существенному абразивному износу пятна контакта, по сравнению с образцами на ВМ-4;

– при малых концентрациях магнитных частиц в ВМ-4 отмечены резкие скачки температуры, что связано со схватыванием контактирующих поверхностей;

– состав № 4 (основа УПИ) способствует плавному росту температуры на протяжении всего испытания.

Следует отметить, что на процесс трения, микрорезания и микрошлифования при использовании *МРЖ* оказывает влияние большое количество факторов, что, в свою очередь, требует дополнительных инструментальных исследований на стендах, смонтированных непосредственно на металлорежущем оборудовании с применением специально спроектированной технологической оснастки.

Список литературы

1. *Гаршин А. П.* Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин [и др.]. — М.: Научтехиздат, 2003. — 384 с.
2. *Левин М. Л.* К вопросу о теплообмене в процессе магнитореологического полирования / М. Л. Левин, Л. К. Глеб // 5th Minsk International Heat and Mass Transfer Forum, 2004. URL: http://www.imamod.ru/~serge/arc/conf/MIF_2004/S06/6-20.pdf (Дата обращения 9.11.2012).
3. Пат. 088002 ВОИС. System for magnetorheological finishing of substrates / W. Kordonski [и др.]. Оpubл. 28.06.2012.
4. *Яковлев О. Б.* Магнитореологическая доводка оптических деталей / О. Б. Яковлев, М. А. Ломакова, В. А. Дерябин // Прикладная оптика-2010: материалы IX Междунар. конф. — СПб., 2010. — Т. 2. — С. 154.
5. *Помогайло А. Д.* Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. — М.: Химия, 2000. — 672 с.
6. *Rodin V. M.* Modification of Iron Nanoclusters by Perfluorinated Radicals / V. M. Rodin [et al] // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. — 2008. — Т. 16. — № 5–6. — С. 706–710.
7. *Singh Anant Kumar.* Nanofinishing of atypical 3D ferromagnetic work piece using ball end magnetorheological finishing process / Anant Kumar Singh, Sunil Jha n, Pulak M. Pandey // International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2012. — № 63. — С. 21–31.
8. *Петров В. М.* Применение модификаторов в узлах машин для решения триботехнических задач / А. М. Петров. — СПб.: СПбГПУ, 2004. — 282 с.
9. *Jang K. I.* Deburring microparts using a magnetorheological fluid / K. I. Jang [et al] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2012. — Vol. 53. — № 1. — P. 170–175.
10. *Кулаченков С. А.* Перспективы применения в судостроении магнитных жидкостей с особыми реологическими свойствами / С. А. Кулаченков, В. Ю. Елоховский, В. М. Петров // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на водном транспорте: тр. V Международного симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо-2013», 10—11 октября 2013 г. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — С. 222–228.
11. *Безпальчук С. Н.* Обобщенная модель состояния качества поверхности ответственных деталей судовых энергетических установок, выполненных из композиционных углепластиков / С. Н. Безпальчук, А. А. Буцанец, В. М. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 97–102.

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.611

А. А. Давыденко,
канд. экон. наук;

А. В. Кириченко,
д-р техн. наук, проф.;

А. Л. Кузнецов,
д-р техн. наук, доц.

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

THEORETICAL JUSTIFICATION FOR THE DEVELOPMENT OF MULTI-USERS TRANSPORTATION SYSTEM IN THE ARCTIC REGION OF RUSSIAN FEDERATION

Рассматриваются задачи, методология и этапность формирования концепции транспортной системы совместного использования в акватории Северного морского пути. Предлагаемая методология обуславливает формирование результатов исследования, направленных на оптимизацию производственной деятельности отдельных транспортных и морехозяйственных комплексов, т.е. на повышение эффективности отдельных разнородных и разноотраслевых производственных систем – пользователей акваторией и инфраструктурой Арктики. Применительно к федеральным органам исполнительной власти (ФОИВ) России, в интересах которых в акватории Арктики выполняются морские перевозки и производится иная морехозяйственная деятельность, в качестве результата исследования рассматривается проект формируемой интегрированной (единой) системы управления морскими перевозками и морехозяйственной деятельностью ФОИВ, обеспечивающей рациональное совместное использование транспортных средств и инфраструктуры, минимизирующее совокупные бюджетные затраты на выполнение перевозок.

The paper focuses on the goals, methodology and staging of the development of the multi-users shared transportation system in the water areas along the Northern Sea Route. At the same time similar in terms of technology (or even identical) transport operations performs many heterogeneous (multidepartmental) users. The proposed methodology is expected to provide the results of the study oriented to the optimization of separate transportation and economic complexes and eventually on the improvement of the performance and efficiency of separated industrial systems of different subordancy jointly using the Arctic transportation system. The given hypothesis and methodology of the study suggest the production of the regulatory framework in respect of the formation of an integrated (single) management of maritime shipping and activities of federal agencies of executive power.

Ключевые слова: транспортная система совместного использования, Северный морской путь, разнородные и разноотраслевые производственные системы.

Key words: multi-users transportation system, Northern Sea Route, industrial systems of different subordancy.

Формирование гипотезы

В настоящее время в акватории Северного морского пути (СМП) и в Арктической зоне Российской Федерации продолжают развиваться транспортное судоходство, ведение промышленного лова, геологоразведочных работ и добычи углеводородов на полярном шельфе. Политика государства направлена на поддержку дальнейшего освоения Арктики [1] – [3].

Этим обуславливаются интенсификация перевозок, обеспечивающих повседневную деятельность предприятий, организаций и их подразделений, непосредственно выполняющих рабо-

ты в Арктике, а также социально значимых для населения и, с другой стороны, соответствующее развитие транспортной и сопутствующей инфраструктуры. При этом особые условия Заполярья не позволяют сооружать инфраструктурные объекты в избыточном количестве. Отдельные партии доставляемых грузов снабжения (в том числе в рейдовые пункты) однородны по номенклатуре, но количественно невелики. Одновременно сходные в технологическом отношении (или даже полностью идентичные) транспортные операции выполняет множество разнородных (разноведомственных) пользователей.

Отсюда выдвигается общая гипотеза: рационализация совместного использования федеральными органами исполнительной власти и хозяйствующими субъектами объектов инфраструктуры и транспортных средств в российской Арктике, которая минимизирует совокупные бюджетные затраты на выполнение перевозок материальных средств (средств снабжения).

История и текущее состояние предметной области

В период административной экономики вопросы рациональной эксплуатации СМП решались централизованно. В 1932 г. было создано Главное управление Северного морского пути (Главсевморпуть, ГУСМП) – государственная организация для народно-хозяйственного освоения Арктики и обеспечения судоходства по СМП (до 1946 г. – Главное управление при Совнарком СССР, с 1946 по 1953 г. – Главное управление при Совете Министров СССР). Планирование выделения тоннажа для выполнения снабженческих перевозок по «северному» (экспедиционному) заводу осуществлялось посредством централизованной же подачи ведомственных заявок в Госплан СССР (Государственный плановый комитет Совета Министров СССР – государственный орган, осуществлявший общегосударственное планирование развития народного хозяйства СССР и контроль выполнения народнохозяйственных планов). Кроме того, для реализации государственной политики в Арктике функционировали Совет по проблемам Севера и Арктики при Правительстве Российской Федерации и Государственный комитет по делам Севера.

В настоящее время Федеральное государственное казенное учреждение «Администрация Северного морского пути» (созданное распоряжением Правительства Российской Федерации от 15 марта 2013 года № 358-р на основании п. 3 ст. 5.1 Федерального закона от 30 апреля 1999 г. № 81-ФЗ «Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации») предназначено исключительно для осуществления организации плавания судов в акватории Северного морского пути. Основными заявленными целями деятельности Учреждения являются обеспечение безопасности мореплавания и защиты морской среды от загрязнения с судов в акватории Северного морского пути [4].

Проведённые исследования показали, что до настоящего времени работы по освоению арктических территорий носят фрагментарный, разноведомственный характер [5], [6]. Выполненные прикладные научные труды посвящены, в основном, вопросам, локализованным по подходам:

- ведомственному [7] – [9], причём в работе О. А. Изотова впервые была обоснована идея формирования локальных транспортных систем совместного использования (ТССИ);
- транспортно-отраслевому (внутренний водный транспорт) и региональному [10] – [14].

Таким образом, определяется актуальная научная проблема: сформировать научные основы рациональной организации и управления транспортными системами совместного использования в российской Арктике, в том числе на акватории транзитного Северного морского пути. Целью её решения будет минимизация совокупных затрат на выполнение снабженческих перевозок, в том числе экспедиционного завоза материальных средств в российской Арктике.

Задачи, методология и этапность исследования

На предварительном этапе формирования концепции ТССИ предполагается дифференциация трёх основных компонентов морских перевозок в Арктике:

- 1) транзитные (в том числе кросс-трейдинг);
- 2) экспортно-импортные, в основном связанные с мировой торговлей;

3) каботажные (внутренние морехозяйственные) – в основном определяемые внутренними государственными (в том числе социальными) потребностями.

Таким образом, предлагается следующая общая методология исследования.

Первый этап – определяется перечень субъектов, участвующих в планировании и выполнении морских перевозок и других видов морехозяйственной деятельности в Арктике; определяются особенности их деятельности, производится условная кластеризация видов деятельности.

Идентифицируются «внешние» участники, находящиеся вне доступной системы управления, в отношении которых возможно только реактивное или проактивное поведение.

Для обоих выделенных кластеров определяются границы достоверности прогнозных оценок.

Для выделенных кластеров участников морских перевозок и иной морехозяйственной деятельности производится предварительный анализ требований к транспортной (в том числе портовой) инфраструктуре и применяемым технологиям для оценки возможности как совместного использования, так и конкуренции (экономической и технологической).

Гипотеза этапа исследования предполагает, что работы, производимые по единой или сходным технологиям, могут выполняться комплексно, в интересах ряда участников, что приведёт к ожидаемому эффекту масштабной экономии.

Предлагается методология, предусматривающая производство комплексного анализа по критериям как вида морских перевозок и морехозяйственной деятельности, так и по технологии и географическому размещению места производства работ.

Собственно морские перевозки рассматриваются как:

- экспортно-импортные многономенклатурных грузов из портов общего назначения;
- импортные массовых грузов из северных портов и портопунктов;
- снабженческие регулярные в северные порты, портопункты и гидросооружения;
- снабженческие экспедиционные в портопункты, на необорудованный берег;
- снабженческие строительные в портопункты;
- снабженческие строительные на необорудованный берег и сооружения (гидротехнические, гидрометеорологические, навигационные, шельфовые);
- экспедиционные, в том числе по экологическому мониторингу и очистке;
- транспортные транзитные;
- пассажирские транспортные;
- пассажирские круизные и пр.

Указанный подход позволяет формировать транспортные системы совместного использования в интересах ряда пользователей. Он же, кроме выполнения перевозок, распространяется и на другие виды морехозяйственной деятельности в Арктике.

Произведённый анализ, на основе оптимизационного имитационного моделирования, позволяет:

- рационализировать маршруты и загрузку судового состава совместного использования на сети существующих портов, портопунктов, рейдовых пунктов и сооружений;
- оптимизировать как создаваемые сети портопунктов, так и в целом логистические системы комплексного многономенклатурного снабжения – при развитии арктических территорий;
- разработать новые технологические системы производства погрузочно-разгрузочных работ во внепортовых условиях, ориентированных на сохранение общеноменклатурных форм перевозимых грузов.

В указанных целях предполагается проанализировать объёмы и структуру перевозок грузов укрупнённых номенклатур в Арктике:

- генеральные грузы (в том числе ГСМ в таре);
- массовые грузы («балк» – насыпные и наливные грузы);
- унифицированные грузы («необалк» – пакеты, накатные грузы);
- контейнеризированные грузы.

Указанный анализ позволит сформулировать критерии, относящие порты (портопункты) Арктики к той или иной стадии их технологического развития (по классификации UNCTAD). На этом основании формируются предложения по составу и численности технологического оборудования в портах, требования к территории, складским мощностям и акватории портов (портопунктов).

Определяется необходимость (в отдельных случаях) перехода от традиционных (конвенциональных) морских портов к современным перегрузочным комплексам, включающим, в том числе логистическую инфраструктуру для консолидации и распределения многономенклатурных средств снабжения и транзитных грузов.

Второй этап – определяются потенциальные укрупнённые (в том числе межведомственные) ТССИ; из них выделяются укрупнённые (межведомственные) системы комплексного многономенклатурного снабжения, применяемые при перевозках, направленных на развитие инфраструктуры, и экспедиционном завозе.

Третий этап – разрабатываются комплексные математические модели (оптимизационные, имитационные) функционирования отдельных разнородных ТССИ, обеспечивающие их рациональное управление и производственную деятельность.

Четвёртый этап – формируется комплексная имитационная модель функционирования ТССИ, позволяющая производство достоверного прогноза как общих, так и частных параметров отдельных взаимодействующих систем с учётом, во-первых, рационального развития отдельных компонентов общей модели, и, во-вторых, взаимовлияния компонентов в условиях внешней среды. Предусматривается задание различных сценариев развития системы.

Выводы

Предлагаемая методология обуславливает формирование результатов исследования, направленных на оптимизацию производственной деятельности отдельных транспортных и морехозяйственных комплексов, т.е. на повышение эффективности отдельных разнородных и разнотраслевых производственных систем – пользователей акваторией и инфраструктурой Арктики.

Применительно к ФОИВ России, в интересах которых в акватории Арктики выполняются морские перевозки и производится иная морехозяйственная деятельность, в качестве результата исследования рассматривается проект формируемой интегрированной (единой) системы управления морскими перевозками и морехозяйственной деятельностью ФОИВ, обеспечивающей рациональное совместное использование транспортных средств и инфраструктуры, минимизирующее совокупные бюджетные затраты на выполнение перевозок.

Приведённые гипотеза и методология предполагают проведение исследования нормативно-правовой базы в части, касающейся формирования интегрированной (единой) системы управления морскими перевозками и морехозяйственной деятельностью ФОИВ, например, на основе известного опыта ряда ФОИВ 2000-х гг.

Список литературы

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rg.ru/2009/03/30/arktika-osnovy-dok.html> (дата обращения – 27.05.2015).
2. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/news/432/> (дата обращения – 27.05.2015).
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации “Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года”». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://programs.gov.ru/Portal/programs/passport/38> (дата обращения – 27.05.2015).

4. Предмет деятельности и функции АСМП. Официальный сайт Федерального государственного казенного учреждения «Администрация Северного морского пути». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://asmp.morflot.ru/ru/celi_funktsii/ (дата обращения — 12.04.2015).

5. Коновалов А. М. Система государственного стратегического планирования развития Арктической зоны Российской Федерации / А. М. Коновалов // Наука и транспорт. Морской и речной транспорт. — 2013. — № 1 (5). — С. 57–63.

6. Городецкий А. Е. Правовые и методические проблемы стратегического планирования развития арктических регионов России / А. Е. Городецкий, В. В. Иванов, Б. Н. Филин // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 4–13.

7. Изотов О. А. Оптимизация процесса эксплуатации средств морского и внутреннего водного транспорта в составе транспортных систем совместного использования: дис. ... канд. техн. наук: 20.02.17. СПб. — 2005.

8. Толстых Д. А. Региональные промышленно-логистические портовые терминалы как элемент формирования интегрированной транспортной инфраструктуры: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. СПб. — 2009.

9. Касаткин Р. Г. Методика обоснования логистической системы морской транспортировки сжиженного природного газа из Арктики: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. СПб. — 2006.

10. Бугаев В. А. Организация доставки грузов речным транспортом в районы Крайнего Севера и Заполярья: на примере Западной Сибири: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. Новосибирск. — 2005.

11. Валеев В. А. Совершенствование завоза грузов в Арктические районы Северо-Востока России речным транспортом: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. Новосибирск. — 2003.

12. Зачёсов А. В. Организация перевозок и работы флота на малых реках Сибири в условиях формирования рыночных отношений: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. Новосибирск. — 2009.

13. Попов А. С. Совершенствование организации завоза грузов на территорию Республики Саха (Якутия) через воднотранспортные узлы: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. Новосибирск. — 2005.

14. Сергеева Т. С. Оптимизация транспортного обслуживания региона: на примере завоза грузов в Республику Саха (Якутия): дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. Н.-Новгород. — 2004.

УДК 330

Т. А. Пантина,
д-р экон. наук, проф.;

С. А. Бородулина,
д-р экон. наук, доц.

**К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
ПОДПРОГРАММЫ «ВНУТРЕННИЙ ВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ»
ФЦП «РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ (2010 – 2020 ГОДЫ)»**

**FORMATION OF MONITORING SYSTEM FOR FEDERAL PROGRAM
«DEVELOPMENT OF TRANSPORT SYSTEM IN RUSSIA (2010 – 2020)»
(DIRECTION «INLAND WATER TRANSPORT»)**

В статье исследована актуальность осуществления вложений в развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта, изучены целевые индикаторы развития подотрасли, рассмотрено текущее состояние вопросов контроля и мониторинга реализации Федеральных целевых программ (ФЦП). На основе проведенного исследования, с учетом существующей тенденции сокращения бюджетных расходов на реализацию ФЦП в современных экономических реалиях и необходимости повышения их результативности, авторами разработаны укрупненная схема и научно обоснованные предложения по формированию системы мониторинга подпрограммы «Внутренний водный транспорт» ФЦП «Развитие транспортной

системы России (2010 – 2020 годы)» с целью повышения качества управления её реализацией, обоснованы предложения по уточнению целевых индикаторов подпрограммы.

This article describes the relevance of investments in the inland waterway infrastructure development. We have studied the target indicators of water transport development, examined the current state of control and monitoring of the federal target programs the implementation. We developed a scheme for monitoring of the federal programs implementation, justified monitoring system for program «Inland water transport» Federal program «Development of Transport System of Russia (2010–2020)» to improve the quality of the program management with a tendency to reduce budget investments and performance gains. We also suggest measures to increase sub-sector «inland waterway transport» indicators.

Ключевые слова: внутренний водный транспорт, система мониторинга, Федеральная целевая программа, целевые индикаторы и показатели.

Key words: inland waterway transport, monitoring system, Federal program, target figures and indicators.

В ЕВРОПЕЙСКОЙ части страны функционирует не имеющая аналогов в мире Единая глубоководная система (ЕГС) протяженностью 6,5 тыс. км, по водным путям которой перевозится около 70 % общего объема речных перевозок, проходят основные экспортно-импортные грузопотоки. Однако наличие лимитирующих участков — «узких мест», не позволяет в полной мере использовать ее огромный потенциал, более того, обеспечение сквозного судоходства по магистральным водным артериям становится все более проблематичным. Введение в навигацию 2014 г. вынужденного ограничения по пропуску судов в зависимости от их осадки на участке от Городецких шлюзов до Балахны является ярким тому подтверждением.

Ухудшение качественных параметров внутренних водных путей и наличие узких мест привело к переключению части грузопотоков, прежде всего массовых грузов, потенциально тяготеющих к внутренним водным путям, на наземные виды транспорта, прежде всего автомобильный транспорт. Из года в год возрастает загруженность автомобильных дорог. При этом массовые строительные грузы – песок, щебень, гравий, нередко перевозятся грузовыми автомобилями параллельно водным путям [1].

ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы)» [2] предусмотрена реализация проектов ликвидации лимитирующих участков на ЕГС и решение других проблем для повышения конкурентоспособности и роста объемов перевозок по внутренним водным путям страны.

Федеральные целевые программы являются важным экономическим инструментом и позволяют в рамках программно-целевого метода сосредоточить усилия на комплексном и системном решении среднесрочных и долгосрочных проблем экономической и социальной политики государства, обеспечить прозрачность и обоснованность выбора целей для решения возникших проблем, а также определить пути достижения желаемого будущего состояния (результата) объекта с использованием, в случае необходимости, разных форм поддержки и финансирования на федеральном уровне.

Современный аудит эффективности является относительно новым методом контроля выполнения целевых программ, необходимость его очевидна в связи с тем, что государственные средства вообще, а средства, выделяемые на ФЦП, в особенности, должны эффективно, экономно расходоваться и соответствовать целевому назначению.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 2 августа 2010 г. № 588 [3] в целях контроля реализации государственных программ Министерство экономического развития Российской Федерации на постоянной основе поручило осуществлять мониторинг реализации государственных программ ответственным исполнителям и соисполнителям. Согласно п. 3 этого документа государственная программа включает федеральные целевые программы и подпрограммы, содержащие, в том числе, ведомственные целевые программы и основные мероприятия органов государственной власти. Мониторинг осуществляется и в отдельных сферах экономики в

целях информационной поддержки разработки и реализации государственной политики РФ, непрерывного системного анализа и оценки состояния и перспектив развития (в том числе в части эффективности деятельности организаций отраслей экономики), усиления результативности их функционирования за счет повышения качества принимаемых управленческих решений, а также в целях выявления нарушения требований законодательства. Вопросы мониторинга программ с государственным участием также рассмотрены в документах [4], [5], в статьях [6] – [8] и др. Мониторинг включает в себя сбор информации, обработку, систематизацию и хранение полученной информации, а также непрерывный системный анализ состояния и перспектив развития, выполненный на основе собранной информации.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 26 июня 1995 г. № 594 [9] для обеспечения мониторинга и анализа хода реализации целевой программы государственный заказчик (государственный заказчик-координатор) целевой программы ежегодно согласовывает с Минэкономразвития России и Минфином России уточненные показатели эффективности программы на соответствующий год, а в дальнейшем ежеквартально отчитывается о ходе их выполнения. В соответствии с п. 37 «Порядка разработки и реализации федеральных целевых программ и межгосударственных целевых программ, в осуществлении которых участвует Российская Федерация», государственный заказчик федеральной целевой программы должен представить в Минэкономразвития России отчеты об итогах выполнения ФЦП и Федеральной адресной инвестиционной программы на текущий год и на плановый двухлетний период с целью дальнейшего свода к рассмотрению на заседании Правительства РФ. Отчеты представляются поквартально и за год. Ежеквартально Минэкономразвития России направляется указание о заполнении форм, которые могут незначительно меняться.

Кроме того, указано, что государственный заказчик целевой программы ежегодно, с учетом выделяемых на реализацию целевой программы финансовых средств, уточняет при необходимости целевые индикаторы и показатели, затраты по мероприятиям целевой программы, механизм ее реализации, состав участников целевой программы и в месячный срок после принятия федерального закона о федеральном бюджете на очередной финансовый год и на плановый период в порядке, предусмотренном для проекта целевой программы, представляет в Минэкономразвития России указанную корректировку целевой программы для последующего внесения на утверждение в Правительство РФ.

Результаты исследований Аналитического центра при Правительстве РФ [10], показывают, что система мониторинга проектов и программ в настоящее время в большей степени реализует функции оперативного мониторинга, т.е. позволяет осуществлять мониторинг распределения бюджетных средств по комплексу целей, отмечать фактическое исполнение запланированных мероприятий. В то же время мировая практика свидетельствует, что включение экспертной оценки в процесс мониторинга государственных программ и проектов в значительной степени расширяет возможности информационной системы управления результатом. Так, по мнению авторов, в рамках оперативного мониторинга экспертное знание необходимо для выявления сбоев в реализации проектов, выяснения причин их возникновения, оценки влияния сбоев на проектные решения, внесение предложений по корректировкам проекта. Стратегический мониторинг требует участия экспертов в оценке проблемной ситуации, возможностей ее разрешения, определении соответствия ожидаемых результатов проекта потребностям целевых социальных групп, значимости конечных эффектов, выявлении устойчивости ожидаемых результатов в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Разработка механизма оценки влияния факторов внешней среды и сопутствующих им изменений внутренних параметров в отраслевом разрезе является особенно актуальным в условиях введения санкций и сложностей, вызванных современной политической ситуацией.

Невысокая результативность ФЦП приводит к невыполнению запланированных целей и задач, распылению средств из федерального бюджета, которые могли бы быть направлены в более успешные социально-экономические проекты. В связи с этим актуальной является задача обеспечения управляемости и подконтрольности государственных финансов, создания условий для

использования их в качестве важнейшего фактора управления развитием страны и отдельных ее отраслей/подотраслей.

На основе проведенного исследования, а также с учетом данных Аналитического центра [10] по организации стратегического мониторинга ФЦП, существующей тенденции сокращения бюджетных расходов на реализацию ФЦП в современных экономических реалиях и необходимости повышения их результативности укрупненная схема мониторинга реализации ФЦП приобретает следующий вид (рис. 1).

Разработка показателей, с помощью которых возможной является оценка результативности конкретной целевой программы, а также постоянный контроль над ходом выполнения программы и достижения ее ключевых индикаторов обеспечит наиболее эффективную и экономную ее реализацию. Изучение данного вопроса является особенно важным в рамках смещения акцента бюджетного процесса от «управления затратами» на «управление результатами».



Рис. 1. Укрупненная схема мониторинга реализации ФЦП

К целевым индикаторам и показателям подпрограммы «Внутренний водный транспорт» ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы)» отнесены следующие:

- 1) протяженность внутренних водных путей, ограничивающих пропускную способность ЕГС европейской части РФ, тыс. км (П) / процентов (П, %);
- 2) доля судоходных гидротехнических сооружений, подлежащих декларированию безопасности и имеющих опасный уровень безопасности ($d_{\text{опасн}}$);
- 3) доля судоходных гидротехнических сооружений, подлежащих декларированию, имеющих неудовлетворительный уровень безопасности ($d_{\text{неуд}}$);
- 4) поставки судов обслуживающего флота ($N_{\text{обсл}}$);
- 5) пополнение транспортного флота ($N_{\text{трансп}}$).

Динамика указанных индикаторов и показателей подпрограммы на 2010 – 2020 гг. составлена на основе [2] и приведена на рис. 2. Так, в соответствии с подпрограммой «Внутренний водный транспорт» ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы)» планируется довести с 2,4 % до нуля долю судоходных гидротехнических сооружений, подлежащих декларированию безопасности и имеющих опасный уровень безопасности. Подлежит также последовательному сокращению доля судоходных гидротехнических сооружений, подлежащих декларированию, имеющих неудовлетворительный уровень безопасности: с 21,3 % до 9,0 % за период действия ФЦП. Суда обслуживающего флота планируется увеличивать ежегодно с 1 – 12 ед. в 2011 – 2014 гг. с нарастанием до 70 – 71 ед. в 2019 – 2020 гг., пополнение транспортного флота планируется на уровне 10 – 13 ед. ежегодно в период действия программы.

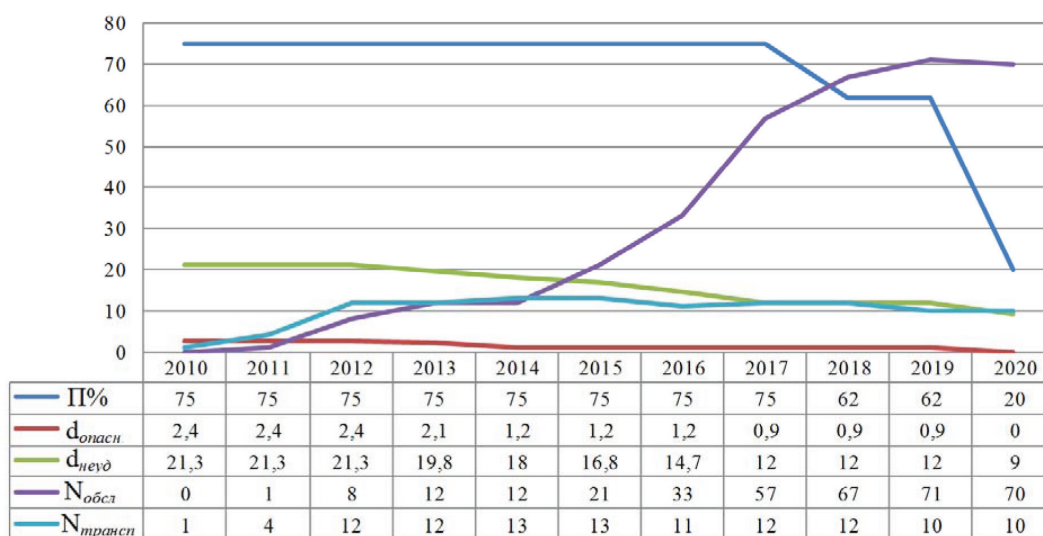


Рис. 2. Целевые индикаторы и показатели подпрограммы «Внутренний водный транспорт»

Системный анализ выполнения показателей и индикаторов подпрограммы «Внутренний водный транспорт» за ретроспективный период должен включать:

- оценку текущего состояния внутренних водных путей, ограничивающих пропускную способность, анализ выполнения мероприятий по устранению «узких мест» и обоснование, в случае необходимости, их дополнительного финансирования, выводы по корректировке соответствующего индикатора;
- анализ реализации мероприятий по комплексной реконструкции судоходных гидротехнических сооружений, выводы по корректировке индикатора снижения доли судоходных гидротехнических сооружений, имеющих неудовлетворительный и опасный уровни безопасности;
- анализ целесообразности изменения (дополнения) комплексных проектов реконструкции по сооружениям, имеющим неудовлетворительное и опасное техническое состояние в настоящее время, а также в ближайшей перспективе, но не включенным в комплексные проекты реконструкции, прогнозирование изменений соответствующих целевых индикаторов подпрограммы;
- анализ выполнения мероприятий по пополнению транспортного флота за счет внебюджетных источников, возможностей судоходных компаний по финансированию обновления флота, форм государственной поддержки строительства транспортных судов, оценку необходимых объемов пополнения флота на перспективу;
- оценку состояния и уточнение потребности в обновлении технического флота по видам работ, анализ реализации мероприятий по обновлению обслуживающего флота и разработку предложений по их корректировке и финансированию в рамках подпрограммы;

– анализ реализации мероприятий по созданию системы технологической бассейновой связи, актуализацию мероприятий в условиях повышения требований по безопасности и уточнение объемов финансирования по подпрограмме.

Предлагаемая схема мониторинга подпрограммы «Внутренний водный транспорт» представлена на рис. 3.

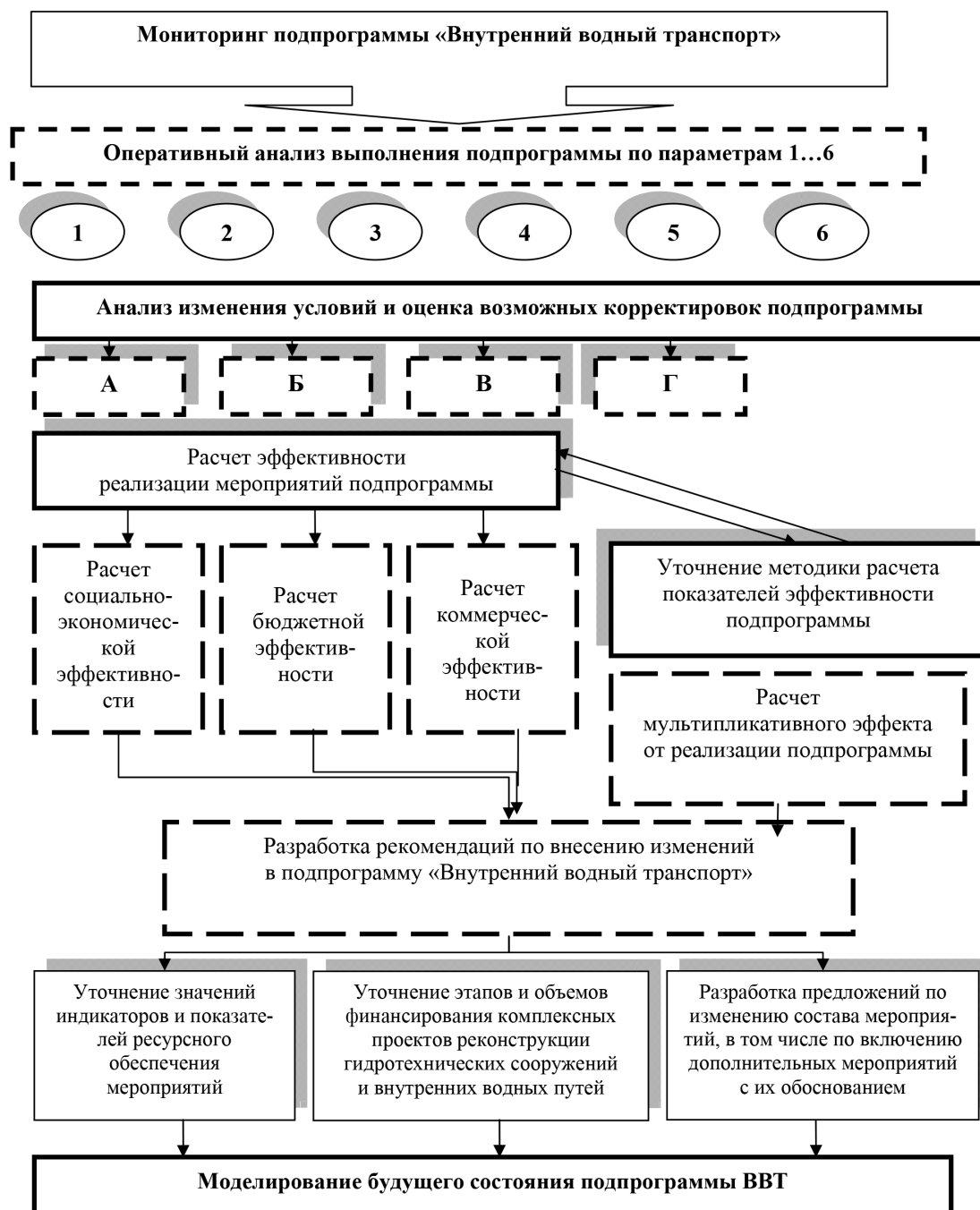


Рис. 3. Схема мониторинга подпрограммы «Внутренний водный транспорт»

Данные 1 – 6 на рис. 3 включают:

- 1) сведения о финансовых результатах и их соответствии фактическим затратам на реализацию подпрограммы за отчетный период;
- 2) данные о целевом использовании и объемах привлеченных средств федерального бюджета, бюджетов субъектов РФ и внебюджетных источников;

3) сведения о соответствии фактических показателей (индикаторов) реализации подпрограммы показателям, установленным при ее утверждении;

4) сведения о наличии, объемах и состоянии незавершенного строительства;

5) сведения о результативности прикладных научных исследований и экспериментальных разработок, выполняемых по договорам на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ;

6) оценка эффективности результатов реализации подпрограммы и оценка влияния фактических результатов ее реализации на различные сферы экономики страны (оценка мультипликативного эффекта).

Анализ изменения условий реализации подпрограммы «Внутренний водный транспорт», оценку степени и направлений её корректировки предлагается выполнять по следующим основным направлениям:

А) Анализ и оценка влияния изменения макроэкономических параметров развития экономики России на состояние внутреннего водного транспорта за предыдущий период и на перспективу до 2020 г.

Б) Анализ стратегических документов развития транспортной отрасли для обоснования направлений корректировки подпрограммы и ее параметров, анализ стратегических документов социально-экономического развития регионов.

В) Анализ влияния региональных факторов на развитие внутреннего водного транспорта.

Г) Анализ выполнения мероприятий подпрограммы «Внутренний водный транспорт» за ретроспективный период с 2010 года по текущий год.

На основе анализа и обобщения результатов, полученных в ходе выполнения НИР по заказу Росморречфлота, разработаны предложения по внесению изменений в подпрограмму «Внутренний водный транспорт» в части уточнения целевых индикаторов (показателей), объемов ресурсного обеспечения, состава мероприятий.

В 2010 – 2014 гг. установленные индикаторы и показатели были выполнены. Своевременное освоение выделяемых по подпрограмме средств из федерального бюджета обеспечило реализацию запланированных мероприятий по реконструкции объектов инфраструктуры внутренних водных путей в полном объеме и достижение установленных индикаторов (показателей) на 2014 г.

В то же время анализ ресурсного обеспечения программных мероприятий на период до 2020 г. подтверждает необходимость корректировки значений целевых индикаторов (показателей), отражающих реализацию тех мероприятий, которые не в полной мере обеспечены финансированием.

Ограниченное финансирование программных мероприятий в 2002 – 2009 гг., а также некоторое сокращение финансирования в 2010 – 2013 гг. по подпрограмме (по сравнению с вариантом 2008 г.) стало сдерживающим фактором развития внутреннего водного транспорта, в том числе улучшения технического состояния судоходных гидротехнических сооружений. Это подтверждают и актуализированные расчеты показателей эффективности подпрограммы.

На реконструкцию 80 судоходных гидротехнических сооружений, строительство второй нитки Нижне-Свирского шлюза на Волго-Балте, строительство Нижегородского низконапорного гидроузла на реке Волга, обновление судов технического флота, а также реконструкцию сетей ведомственной технологической связи в рамках подпрограммы предусмотрено всего 202,9 млрд руб. средств федерального бюджета, при этом основная доля капитальных вложений (107,3 млрд руб. или 52,9 %) приходится на период последних трех лет ее реализации (2018 – 2020 гг.). «Сгущение» финансовых средств в конце периода при недостатке финансирования в предыдущие годы может привести к нарушению сроков и высоким рискам освоения средств в полном объеме, поскольку реконструкция объектов проводится в ограниченное время (в межнавигационный период) без остановки судоходства и, как следствие, к недостижению запланированного уровня показателей.

Для реализации стратегических целей и задач по развитию внутреннего водного транспорта до 2020 г. целесообразно более «плавное» распределение объемов финансирования программных мероприятий по годам с учетом технологических возможностей выполнения реконструкции и

строительства новых судоходных гидротехнических сооружений без остановки судоходства при выполнении сроков реализации запланированных мероприятий.

Проектные работы по строительству Нижегородского низконапорного гидроузла целесообразно завершить к 2016 г., увеличив в Федеральной адресной инвестиционной программе (ФАИП) средства на проектные работы. При запланированных объемах финансирования возникают риски несвоевременного ввода в эксплуатацию данного стратегического для отрасли объекта. В этом случае подлежит корректировке индикатор «Протяженность (доля внутренних водных путей), ограничивающих пропускную способность Единой глубоководной системы европейской части Российской Федерации»: на конец 2020 г. он сохранится на уровне 2019 г. и составит 4 тыс. км (62 %) вместо запланированных 1,3 тыс. км (20 %).

В условиях секвестирования средств федерального бюджета становится проблематичным выполнение программы обновления технического флота в полном объеме, как и достижение соответствующих целевых показателей, имеется дефицит средств по финансированию комплексных проектов (на основании разработанной и прошедшей Госэкспертизу проектно-сметной документации).

Для решения задачи реконструкции судоходных гидротехнических сооружений в составе комплексных проектов после 2020 г. уже сейчас целесообразно формировать заявки на выделение средств в рамках федеральных адресных инвестиционных программ на проектные работы. В условиях недостатка финансирования целесообразно также пересмотреть первоочередность ведения работ по реконструкции гидротехнических сооружений исходя из комплексного анализа информации о техническом состоянии объектов, их уровне безопасности с учетом рекомендаций, полученных в результате проведения декларационных обследований.

В целом, исходя из изложенного, можно сделать вывод, что после 2018 г. возможно внесение изменений в целевые индикаторы подпрограммы: «Доля судоходных гидротехнических сооружений, подлежащих декларированию безопасности и имеющих опасный уровень безопасности» и «Доля судоходных гидротехнических сооружений, подлежащих декларированию безопасности и имеющих неудовлетворительный уровень безопасности» в сторону их повышения.

Для системного решения задачи ликвидации лимитирующих участков на внутренних водных путях ЕГС целесообразно включение в подпрограмму «Внутренний водный транспорт» проекта строительства Багаевского гидроузла на реке Дон в районе х. Арпачин Багаевского района Ростовской области (объем финансирования – 41 млрд руб., период реализации – 2014 – 2019 гг.), который предусмотрен инновационным вариантом Транспортной стратегии РФ на период до 2030 г.

Для комплексного решения вопросов развития внутреннего водного транспорта целесообразно также проработать вопрос о включении в подпрограмму мероприятий по развитию портовой инфраструктуры, в том числе для обеспечения развития пассажирских перевозок.

Список литературы

1. Пантина Т. А. Ликвидации «узких мест» на внутренних водных путях России / Т. А. Пантина // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 5 (70). — С. 49–53.
2. Постановление Правительства РФ от 05.12.2001 г. N 848 (ред. от 30.09.2014) «О Федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы)»». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.garant.ru/1587083/1/> (дата обращения — 13.04.2015).
3. Постановление Правительства РФ от 2 августа 2010 г. № 588 «Об утверждении Порядка разработки, реализации и оценки эффективности государственных программ Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.garant.ru/198991/> (дата обращения — 13.04.2015).

4. Приказ Министерства экономического развития Российской Федерации (Минэкономразвития России) от 26 декабря 2012 г. № 817 «Об утверждении Методических указаний по разработке и реализации государственных программ Российской Федерации». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://economy.gov.ru/minec/about/structure/depStrategy/doc20121226_0007 (дата обращения — 13.04.2015).

5. Приказ Министерства экономического развития РФ от 20 ноября 2013 г. № 690 «Об утверждении Методических указаний по разработке и реализации государственных программ Российской Федерации». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70485826/> (дата обращения — 16.04.2015).

6. Жданчиков П. А. Структурный анализ оценки эффективности федеральных целевых программ / П. А. Жданчиков // Экономический анализ: теория и практика. — 2009. — № 34. — С. 31–37.

7. Куринэ С. Х. Основные проблемы разработки и реализации федеральных целевых программ в рамках развития науки и технологий оборонной промышленности / С. Х. Куринэ, А. Е. Николаев // Вестник Московского университета им. С. Ю. Витте. — 2013. — № 4(6). — С. 42–46.

8. Остапюк С. Ф. Организационно-методический инструментарий формализованной оценки результатов выполнения проектов НИОКР гражданского назначения федеральных целевых программ / С. Ф. Остапюк // Проблемы современной экономики. — 2008. — № 2(26). — С. 32–35.

9. Порядок разработки и реализации федеральных целевых программ и межгосударственных целевых программ, в осуществлении которых участвует Российская Федерация от 26 июня 1995 года № 594 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 01.07.1996 № 778, от 13.09.1996 № 1101, ..., от 20.03.2003 № 165, от 25.12.2004 № 842). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fcpkultura.ru/docs.php?id=21> (дата обращения — 13.04.2015).

10. Доклад «Организация стратегического мониторинга и аудита в системе государственных программ и проектов» (выполнен в соответствии с Планом экспертных и аналитических работ федерального государственного учреждения «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации» на 2011 г.) / Исп. А. Л. Кузенков. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://viktorvoksanaev.narod.ru/auditdoklad2011.pdf> (дата обращения — 10.04.2015).

УДК 656.078.13

О. А. Изотов,
канд. техн. наук

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЙ В ФОРМИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ РОССИИ

SUBSTANTIATION OF THE OPTIMUM INVESTMENT IN DEVELOPING TRANSPORT INFRASTRUCTURE FOR THE WORK ON THE RUSSIA'S ARCTIC SHELF

Протяженность Российского шельфа нефтегазовой разведки и неразвитость в транспортном отношении прилегающих береговых территорий создают определенные затруднения в формировании промышленных и технологических объектов обеспечения снабжения разведочных и добывающих предприятий. Необходима оценка возможностей размещения таких объектов в наиболее пригодных для этого территориальных анклавах, имеющих транспортную привязку к путям сообщений и транспортным узлам, а также к заводам переработки и перегрузки продукции. Решения о создании береговых баз, взаимоувязанных по технологическим и функциональным задачам с сопряженными транспортными системами, должны основываться на выборе опорной территориальной зоны их будущего размещения и строительства. Сегодня возможность доставки в порты и пункты Крайнего Севера всей номенклатуры грузов целиком и полностью обеспечивают морской и воздушный транспорт, для успешного функционирования которых в арктической зоне России создавались опорные береговые базы. Их современное состояние, перспектива

привязки к наземному транспорту потребует решения ряда задач по оптимизации перспективных капитальных вложений.

The length of the shelf of the Russian oil and gas exploration and inadequate transport against adjacent coastal areas creates certain difficulties in the formation of industrial and technological facilities to ensure the supply of exploration and mining companies. Requires an estimate of accommodation possibilities of such objects in the most suitable for this territorial enclaves with transport binding to the ways of communications and transport hubs, as well as to plants processing and handling of products. The decision to create coastal bases, interconnected by technological and functional problems with conjugate transport systems should be based on the choice of reference territorial area of their future location and construction. Today, the possibility of delivery to the ports of the Far North and items of all range of goods is entirely provide sea and air transport, to the success of which in the Arctic zone of Russia created with the support coastal bases. Their current status and perspective tied to ground transportation will require solving a number of tasks to optimize promising investments.

Ключевые слова: освоение шельфа, нефтегазовый промысел, добыча углеводородов, транспортная система, опорная территориальная зона, капитальные вложения, экономический эффект.

Key words: development of shelf, oil and gas fishing, hydrocarbon production, transportation system, supporting territorial zone, capital investments, economic impact.

Современные требования к инфраструктуре

Несмотря на богатый опыт добычи углеводородов со дна морей и океанов, условия освоения арктического шельфа Российской Федерацией до настоящего времени комплексно и в привязке к проблемам социального развития региона не изучались ни одной из компаний, ни одной из стран, добывающих нефть и газ. Только в апреле 2015 г. создан первый в постсоветской России комплексный государственный орган — Государственная комиссия по вопросам развития Арктики, в составе которой действуют рабочие группы «Развитие транспортной системы», «Развитие промышленности и технологий» и «Социально-экономическое развитие».

Получила признание точка зрения, что основой деятельности нефтегазовых промыслов, планирующих свою деятельность на арктическом шельфе, должна являться оценка значимости и социальной ответственности последствий, а реализуемые ими проекты должны основываться на соблюдении следующих условий:

- обеспечение высокой экономической эффективности реализуемых планов;
- обеспечение соблюдения норм промышленной и экологической безопасности, а также требований по охране труда сотрудников;
- внедрение современных достижений науки, техники и технологий.

Наиболее значимым при этом, исходя из системного анализа проблем, становится инфраструктурное обеспечение морских нефтегазовых проектов, расположенных на огромной протяженности шельфа и неразвитой береговой территории.

Создание на прибрежной территории промышленных и технологических объектов, образующих взаимосвязанную технико-технологическую и транспортную систему в целях обеспечения снабжения разведочных и добывающих предприятий, является основным условием реализации функционирования проектов освоения шельфа.

Организация мощных береговых баз, взаимоувязанных по технологическим и функциональным задачам с сопряженными транспортными системами (путями сообщений и транспортными узлами перегрузки продукции), вспомогательными (базами снабжения) и производственными объектами (заводами по сжижению газа, пунктами подготовки нефти), представляется практичным способом инфраструктурного наполнения морских проектов нефтегазодобычи. Естественно, при условии, что такие объекты будут ориентированы на разработку и последующую эксплуатацию разведанных месторождений (или провинций месторождений) и будут размещаться в наиболее пригодных для этого территориальных анклавах (по подходным глубинам, сопряженности с другими магистральными видами транспорта и по ряду признаков, присущих водным видам транспорта).

Таким образом, актуальной проблемой является разработка комплексных решений об организации вновь создаваемой и развитие существующей транспортной инфраструктуры, обеспечивающей параллельное функционирование производственных и социальных систем и эффективной по капиталовложениям.

Характеристика инфраструктурных объектов

Анализ зарубежного и отечественного опыта освоения шельфовых разработок показывает, что при выборе опорной территориальной зоны будущего размещения и строительства, а также при формировании оценки оснащения баз технологического сопровождения процессов необходимо не столько учитывать исторически сложившиеся в регионе реалии, сколько руководствоваться рядом приоритетных принципов, среди которых основными являются:

- обеспечение транспортных связей минимальной зависимостью от сезонных климатических условий;
- размещение баз технологического сопровождения процессов в относительной близости от месторождений, на территориях, освоенных в социальном отношении, имеющих транспортные связи с глубинными регионами страны (географический фактор);
- оптимизационное сопровождение решения задачи технико-технологического наполнения создаваемых комплексов в целях решения поставленного к реализации функционала;
- максимальное использование существующих объектов производственной и социальной инфраструктуры, а при возможности – и промышленного потенциала рассматриваемого района.

С опорой на перечисленные составляющие и формулируется концепция создания баз технологического сопровождения процессов обеспечения систем добычи на шельфе и транспортировки добываемых углеводородов.

Объекты инфраструктуры, нацеленные на освоение шельфовых месторождений, целесообразно разделить на две основные группы [1] (рис. 1).



Рис. 1. Укрупненная классификация объектов инфраструктуры

Таким образом, ключевую функцию среди объектов инфраструктуры обретают береговые базы как источники ресурсов для обеспечения процессов бурения поисково-разведочных скважин, строительства, обустройства и эксплуатации морских месторождений.

Проблема, связанная с определением конкретных мест размещения и составов баз обеспечения технологических процессов, это их привязка к путям сообщения и пунктам перегрузки, в том числе и тяжеловесного оборудования нефтегазодобывающей отрасли.

При этом такие факторы как низкая степень плотность путей сообщения северных территорий, сезонность работы дорожной сети, связанная с природно-климатическими условиями Севера, на фоне обширных площадей и большой протяженности территорий, прилегающих к морскому побережью, резко ограничивают возможности по целесообразному размещению необходимых промышленных и технологических объектов.

В настоящее время возможность доставки в порты и пункты Крайнего Севера всей номенклатуры грузов, несмотря на ряд мер, предпринимаемых Правительством России (в том числе планирование строительства железной дороги к пунктам Баренцева и Карского морей, а также Обской губы [2]), целиком и полностью обеспечивают морской и воздушный транспорт. Поэтому можно предположить, что именно на их основе в ближайшие десятилетия и будет трансформироваться и развиваться транспортная сеть осваиваемых регионов.

Исторически в арктической зоне России для проведения поисково-разведочных работ и обеспечения безопасности рубежей создавались опорные береговые базы. Для Обской и Тазовской губ — поселок Ямбург, для Карского моря — портопункты Амдерма и Харасавэй, для Печерского моря — поселок Варандей и Индига, для Баренцева моря — порт Мурманск с его портопунктами. И каждый морской порт (портопункт, терминал) становился базой снабжения. Так, например, и Норвегия пошла по пути формирования и реализации концепции строительства рассредоточенных вдоль побережья баз обеспечения морских проектов.

Тот же принцип подчеркивает «Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года» [3], ориентированная на максимальное приближение портов как баз снабжения, переработки и отгрузки продукции к осваиваемым месторождениям.

Но это только вопросы освоения недр, а есть еще звено обеспечения реализации продукции — танкерный грузовой флот. Также впервые в постсоветской России сложились объективные условия для «прикрепления» на долгосрочной основе транспортного флота к районам, обеспечивающим грузовую базу. В особых условиях Севера флот, как показала практика ОАО «Лукойл» и группы «Норильский никель», дальнейшая деятельность по вывозу продукции со стационарного морского ледостойкого отгрузочного причала «Варандей» и морской ледостойкой стационарной платформы «Приразломная» комплектуется из специализированных судов ледового класса специальных проектов («Норильский Никель» (пр. NB-505), «Василий Динков» (пр. 1660), «Михаил Ульянов» (пр. Р-70046)). При этом эксплуатация такого флота в других районах оказывается значительно менее эффективной. Так, по оценкам специалистов до 2020 г. для освоения российского континентального шельфа только ОАО «Газпром» потребуются до 23 танкеров для перевозки сжиженного природного газа.

Таким образом, формирование транспортной инфраструктуры с необходимостью предполагает качественную и количественную оценку взаимодействия «стационарный флот – береговая инфраструктура (порт)».

Моделирование процессов

Существующие диспропорции в уровнях развития основных звеньев морского транспорта (порт – флот), как правило, связаны и со значительной разницей временных затрат на строительство флота и терминалов, и с отсутствием научно обоснованной методики определения потребных капиталовложений в каждое звено с учетом их оптимального взаимодействия.

В публикациях [4] – [6] отмечено, что из-за отсутствия таких методик отрасль может понести значительные потери, причем остается неясным, насколько отличаются от оптимальных об-

щие пропорции развития флота и портов, закладываемые в перспективные планы развития транспорта региона.

Учитывая, что распределение капиталовложений между флотом и портами производится при разработке генеральной схемы развития месторождения [7], рассмотрим решение задачи оптимизации пропорций развития флота и портов (терминалов) на основе реализации математической модели развития бассейна. В качестве аппарата используется линейное программирование с привлечением системы двойственных оценок оптимального плана. Такая система оценок позволяет проанализировать эффективность таких факторов как: освоение тех или иных грузопотоков; увеличение пропускных способностей портов (обоснование их развития); использование определенных типов судов (определение оптимальной структуры флота), а также выделение капиталовложений в развитие флота и портов.

Оптимальный план развития морского бассейна определяет распределение грузопотоков, развитие портов бассейна, выбор оптимальной структуры флота, оптимальное распределение капиталовложений между флотом и портами (терминалами — базами снабжения, переработки и отгрузки) [8].

В качестве целевой функции приняты суммарные приведенные затраты по доставке грузов. Введение ограничения по лимиту капиталовложений в пополняемый флот и в развитие портов отвечает реальным условиям практики.

Однако есть смысл вначале решить задачу без этого ограничения и определить требуемые капиталовложения в развитие каждого звена. Решение задачи при введении ограничения по лимиту капиталовложений в развитие системы «флот – порты» и сопоставление функционалов двух решений данной задачи (F_1, F_2) позволяют выявить потери, связанные с этим лимитом, т.е.

$$\Delta F = F_2 - F_1 \quad (1)$$

и разность

$$\Delta K = K_1 - K_2, \quad (2)$$

где K_1 — капиталовложения, рассчитанные из оптимального плана задачи без ввода указанного ограничения; K_2 — выделенный лимит капиталовложений.

Разность ΔK позволяет выявить недостаток капиталовложений.

Разработка генеральной схемы развития морского бассейна охватывает значительный временной горизонт: 10 – 15 лет [9]. При этом величина капиталовложений точно неизвестна. Целесообразно поэтому исследовать возможности развития системы «флот – порты» при различных уровнях капиталовложений: от минимально необходимых (при которых перспективный объем перевозок еще может быть освоен) до обеспечивающих оптимальные пропорции в развитии флота и портов и устранение «узких мест» в системе.

Доля капиталовложений на устранение сложившихся диспропорций в системе «флот – порты»

$$P = \sum_{i=1}^n \lambda_i p_i, \quad (3)$$

где p_i — затраты на увеличение i -го дефицитного ресурса (например, пропускной способности i -го порта); $\lambda_i p_i$ — затраты на увеличение i -го ресурса на λ_i .

Сформулируем принципы поэтапного определения оптимальных капиталовложений в развитие флота и портов. На первом этапе решается задача без введения ограничений по капиталовложениям в развитие системы «флот – порты», анализируются оптимальный план и вектор двойственных оценок $\lambda_i = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$. При наличии «узких мест» в системе устанавливается доля капиталовложений на их устранение (3). После этого определяются требуемые капиталовложения в развитие каждого звена — флота $K_{\text{фл. опт}}$, портов $K_{\text{п. опт}}$ и оптимальные капиталовложения в развитие системы «флот – порты»

$$K_{\text{фл.-п. опт}} = K_{\text{фл. опт}} + K_{\text{п. опт}}. \quad (4)$$

Установленные на i -ом этапе оптимальные капиталовложения позволяют оценить последствия их ограничений в развитие каждого звена. Для этого на втором этапе введем в модель ограничения по капиталовложениям только во флот (порты), заведомо меньшие оптимальных, т.е. $K_{\text{фл.лим}} < K_{\text{фл.опт}} (K_{\text{п.лим}} < K_{\text{п.опт}})$.

Сравнение доли капиталовложений на устранение «узких мест» в развитии флота (P_2) и портов ($K_{\text{п}}$), рассчитанных из оптимального плана, а затем на развитие системы в целом ($K_{\text{фл.-п.опт}} = K_{\text{фл.лим}} + K_{\text{п.опт}} + P_2$) со значениями, полученными на первом этапе, количественно отражает взаимозависимость уровней развития флота и портов.

На заключительном этапе рассматривается решение задачи при введении ограничения в развитие «флота – портов» бассейна, проводится анализ оптимального плана, вектора двойственных оценок, выявляются «узкие места» в системе и сравнивается доля капиталовложений на их устранение (P_3) со значениями, полученными на предыдущих этапах. Оптимальные капиталовложения в развитие «флота – портов» в этом случае будут равны:

$$K_{\text{фл.-п.опт}} = K_{\text{фл.-п.лим}} + P_3. \quad (5)$$

Применение результатов исследования

Приведенный подход к обоснованию оптимальных капиталовложений в развитие флота и портов исследуемого региона позволяет не только определить оптимальные пропорции их развития и оценить эффективность капиталовложений в каждое звено, но и количественно отразить последствия уменьшения этих значений против оптимальных, показать взаимозависимость уровней развития морского грузового флота и портов. Аналогично могут быть решены задачи и при определении «узких мест» диспропорционального развития других смежных объектов взаимодействующих магистральных видов транспорта, привлекаемых к решению задач разведки, освоения и добычи углеводородов на арктическом шельфе России [10].

Таким образом, рассмотрена методика оптимизации капиталовложений в развитие флота и портов как основных элементов инфраструктуры, необходимой для освоения нефтегазовых месторождений на арктическом шельфе России. Остается возможность включения в модель расширенного комплекса факторов, определяемого всей совокупностью потребностей развития региона.

Список литературы

1. Мансуров М. Н. Инфраструктурное обеспечение освоения углеводородных месторождений Арктического шельфа / М. Н. Мансуров, В. Б. Зак // Журнал Территория нефтегаз. — 2009. — № 4. — С. 34–39.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р «Об утверждении Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года».
3. Проект «Стратегии развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года», одобрен Морской коллегией при Правительстве Российской Федерации 31 октября 2012 года. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://portnews.ru/upload/basefiles/671_strategy_2030.pdf (дата обращения – 15.05.2015).
4. Добыш С. А. Задачи обоснования характеристик грузового флота, и портов с учетом их взаимозаменяемости / С. А. Добыш, Л. Н. Мучник // Труды Института комплексных транспортных проблем при Госплане СССР. — 1982. — №. 90. — С. 26.
5. Добыш С. А. О целях и методах планирования и прогнозирования развития морского транспорта / С. А. Добыш, А. К. Мицевич, Л. Н. Мучник // Труды Института комплексных транспортных проблем при Госплане СССР. — 1982. — № 90. — С. 18.
6. Ильинский А. А. Нефтегазовый комплекс Северо-Запада России. Стратегический анализ и концепция развития / А. А. Ильинский, О. С. Мнацаканян, А. Е. Череповицин. — СПб.: Наука, 2006. — 475 с.

7. Назаров В. И. Экономическая оценка нефтегазового потенциала арктического шельфа России / В. И. Назаров, Л. В. Калист // Нефть. Газ. Промышленность. — 2006. — № 6 (26). — С. 27–30.
8. Распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2010 г. № 2205-р «О Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://archive.government.ru/gov/results/13458/> (дата обращения – 15.05.2015).
9. Раздел «Морской транспорт» Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.mintrans.ru/news/detail.php?ELEMENT_ID=4931 (дата обращения – 15.05.2015).
10. Демарчук Л. Н. Перспективы освоения нефтегазовых месторождений Арктического шельфа / Л. Н. Демарчук // Молодой ученый. — 2014. — № 19. — С. 292–294.

УДК 656.615.071.4:681.3

Т. А. Вепринская,
канд. техн. наук, доц.;

З. А. Панасенко,
инж.

СПЕЦИФИКА ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЧИСЛЕННОСТИ РОЛЛ-ТРЕЙЛЕРНОГО ПАРКА ЛИНЕЙНОЙ КОМПАНИИ

SPECIFICS OF USE THE QUEUING MODEL FOR SEARCH A RATIONAL NUMBER OF ROLL-TRAILERS FOR LINEAR COMPANY

Рассмотрен вопрос определения рациональной численности ролл-трейлеров линейной компании в зависимости от специфики грузопотока; обоснована необходимость поиска компромиссного решения, удовлетворяющего интересы обеих сторон процесса – линии и клиентуры; представлен двойственный алгоритм применения модели массового обслуживания для достижения рационального результата; основу двойственного алгоритма составляет переосмысление прибывающего и обслуживающего потоков модели массового обслуживания; помимо традиционных характеристик эффективности в модель введены дополнительные характеристики, позволяющие реализовать двойственный подход к решению проблемы; в ходе алгоритма по характеристикам эффективности выявляется область взаимных интересов сторон, определяется соответствующее этой области рациональное количество ролл-трейлеров линии и оценивается качество результата; в целях повышения эффективности управления ролл-трейлерным оборудованием компании предлагается кооперированное использование ресурсов отдельных линий, теоретическое изыскание иллюстрируется численными примерами

The issue of determination of a rational number of linear company's roll-trailers in dependence from the specifics of cargo's flow; a necessity of search of a compromise solution satisfactory for both sides of the process, line and client, is proved; the dual algorithm of application of queuing model for achievement of a rational result is represented; a base of the dual algorithm is an ability to reinterpret the conceptions «the arriving flow» and «the servicing flow» of the queuing model; besides the traditional efficiency characteristics the additional ones are entered into the model for to carry out the dual approach to solution of the problem; an area of mutual interests of the sides is established by efficiency characteristics; the rational number of line's roll-trailers is defined according to the compromise area, quality of result is estimated; cooperative use of equipment of separate lines is suggested for improving efficiency of management of company's roll-trailers; theoretical research is illustrated by numerical examples.

Ключевые слова: модель, массовое обслуживание, ролл-трейлер, ро-ро линия, ресурсы, двойственный алгоритм.

Keywords: model, queuing model, roll-trailer, ro-ro line, resources, dual algorithm.

МОРСКАЯ индустрия — это постоянно растущий, сложный бизнес, который существует в условиях взаимодействия с различными рынками, такими как фрахтовый, товарный и др. В управлении типичной морской компании могут быть следующие активы: порты (причалы, терминалы), суда, а также оборудование для консолидации груза (контейнеры, ролл-трейлеры, биг-беги). Эффективность деятельности каждой компании зависит от политики управления её ресурсами, что, прежде всего, связано с выявлением рационального потребного количества ресурсов.

Научное управление ресурсами осуществляется с помощью различных методов, в том числе посредством теории систем массового обслуживания.

Исследования последних лет в этой области представлены трудами как теоретического характера, например работы [1] – [3], так и научно-прикладной направленности.

Применительно к морскому транспорту научные приложения затрагивают, прежде всего, сферу эксплуатации специализированных линий в части ускорения их терминального обслуживания. В статье [4] сокращение стояночной составляющей в рейсооборотах линий достигается, прежде всего, за счёт рационализации управления ресурсами специализированных терминалов в части определения оптимальной численности причалов и порталных кранов. В статьях [5] и [6] рассматривается возможность упорядочения очереди при базировании контейнерных судов на один терминал и применительно к каждой конкретной дате прибытия. В работах [7] и [8] исследуется проблема «перегруженного» контейнерным потоком порта в свете модели массового обслуживания. Гораздо меньше внимания в научной литературе уделяется трамповому флоту. Одной из немногих разработок по теме оптимизации количества судов трампе при исполнении долгосрочного контракта в условиях конкретной производственной ситуации является раздел работы [9, с. 156–163]. В основном научные изыскания морской индустрии, будучи направлены на повышение эффективности эксплуатации специализированных терминалов и, в конечном итоге, флота, разрабатывают рекомендации лишь для одной сферы транспортных ресурсов — портовой.

В то же время специализированные линии также обладают ресурсами – флотом и средствами укрупнения грузов, рациональное управление которыми и обоснование их численности весьма существенно.

Так, для ро-ро линии этот вопрос касается не только определения потребности во флоте, но и в ролл-трейлерах. Так как суда работают в соответствии с жёстким расписанием, их численность определяется с помощью простой арифметической операции: деления рейсооборота на интервал между отходами.

Количественное обоснование другого актива линии — парка ролл-трейлеров — далеко не столь очевидно. Это связано с тем, что и прибытие груза (по размеру партий и их качественному составу) и время возврата порожних ролл-трейлеров под очередные погрузки носят случайный характер. В настоящее время тема определения размеров ролл-трейлерных парков линий практически не отражена в научных разработках. Возможно, это связано со сравнительно небольшой «затратностью» такого оборудования. Однако, роллкерные компании, стремясь к всемерному сокращению издержек, испытывают необходимость в решении этого вопроса, что и предопределило появление в печати статьи [10] и дальнейшее продолжение исследования, представляемое в настоящей статье.

Основой для изысканий явились данные о работе компании «ДФДС Сивейз», в состав которой входят четыре линии: Санкт-Петербург – Карлсхамн – Киль; Усть-Луга – Засниц – Киль; Клайпеда – Киль; Клайпеда – Засниц. Расписание работы линий схематически изображено на рис. 1.

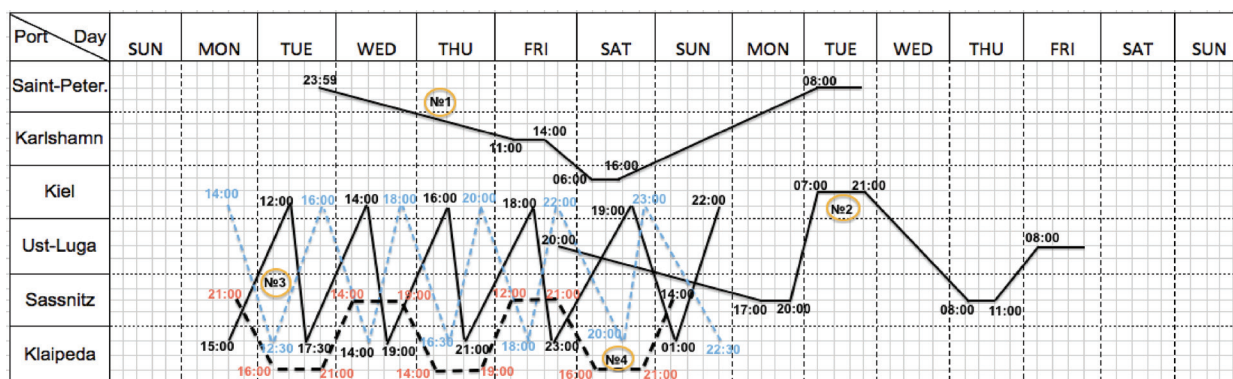


Рис. 1. Расписание работы судов компании «ДФДС Сивейз»¹

Эксплуатационная сущность вопроса подробно рассмотрена в статье [10], где заложены основы научного подхода к решению проблемы с использованием теории систем массового обслуживания. Аналитический аппарат базируется на основных положениях марковской системы массового обслуживания, таких как:

- условие наличия стационарного режима в системе $\rho = \lambda/\mu < 1$, где λ и μ — интенсивности потоков заявок и обслуживания соответственно;
- формула Литтла для среднего времени ожидания обслуживания: $\bar{t}_{\text{ожид}} = \bar{r}/\lambda$, где $\bar{r} = \frac{\rho^2}{1-\rho}$ — среднее число заявок в очереди на обслуживание.

Результативную сущность модели описывают специально введённые характеристики эффективности:

- искомое количество ролл-трейлеров $M = \mu \cdot T_{\text{об}}$, где $T_{\text{об}}$ — параметр модели, обозначающий время оборота ролл-трейлера;
- величина резерва, присутствующего в общем составе оборудования $R = (\mu - \lambda) \cdot T_{\text{об}}$;
- условные оценки устойчивости работы системы (в процентах):

– с позиции клиента $S_{\text{кл}} = (1 - \frac{\bar{t}_{\text{ожид}}}{t_p}) \cdot 100$, где t_p — транзитное время груза;

– с позиции линии $S_{\text{лин}} = (1 - R/M) \cdot 100$;

– с позиции системы в целом $S_{\text{сист}} = \frac{S_{\text{кл}} + S_{\text{лин}}}{2}$.

Предложенное в статье [10] решение может быть отнесено к частному случаю проблемы – перевозке грузов, достаточно близких по ценовым характеристикам, что позволяет использовать оптимизационную модель массового обслуживания со стоимостным показателем эффективности. Однако в условиях перевозки грузов, отличающихся по ценовым характеристикам, из-за отсутствия адекватных стоимостных параметров такой способ решения нецелесообразен.

В качестве продолжения исследования по сформулированной проблеме в настоящей статье предлагается новая трактовка модели массового обслуживания, позволяющая расширить возможности её применения для обобщённой ситуации перевозки разнообразных грузов.

Таким образом, в статье представлен ещё один вариант использования модели массового обслуживания для обоснования рациональной численности ролл-трейлерного парка ро-ро компании. Под рациональной численностью ролл-трейлеров понимается их минимальное количество, необходимое для выполнения конкурентоспособных (т.е. удовлетворяющих клиентуру) транспортных услуг.

Залогом получения качественных результатов модели является тщательно выверенная идентификация и количественная оценка её входных параметров. Для модели массового обслуживания

¹ Схема составлена по данным о работе паромных линий компании «ДФДС Сивейз», iparom.com

к таковым, прежде всего, относятся интенсивности потоков поступления и обслуживания заявок. В рассматриваемой в данной статье модели, описывающей конкретный транспортный процесс, изначальная сложность вопроса состоит в том, чтобы от имеющейся информации о грузопотоках в тоннах перейти к их исчислению в ролл-трейлерах.

Количественная оценка интенсивностей потоков базируется на анализе ситуации в части соизмеримости объёмов экспортных и импортных грузов и направлена на избежание переизбытка или недостатка в ролл-трейлерах.

Большое влияние на результаты модели оказывает параметр, характеризующий время оборота ролл-трейлера в системе перевозок. Чем ближе значение параметра к производственной реальности, тем достовернее результат расчётов. В случае рассмотрения группы линий (компания «ДФДС Сивейз») особую роль при установлении величины этого параметра играет кооперирование ресурсов отдельных линий. Кооперация может иметь место, если разные линии включают общий порт захода. В такой ситуации возможен взаимообмен порожними ролл-трейлерами для их скорейшей подачи под погрузку. Эта процедура призвана уменьшить время оборота ролл-трейлера и, тем самым, направлена на сокращение суммарной (по составляющим линиям) потребности в парке ролл-трейлеров.

Корректное обоснование всех исходных параметров модели в конечном итоге предопределяет снижение издержек управления ролл-трейлерным оборудованием.

Идентификация входных параметров, состоящая в обозначении потоков модели, отражает её эксплуатационное содержание, т.е. сопоставляет позиции участвующих в описываемом процессе сторон — линейной компании и клиента, (где «клиент» — обобщённое обозначение клиентуры). Очевидно, что клиент заинтересован в том, чтобы груз не задерживался в порту из-за нехватки свободных ролл-трейлеров. Следовательно, с позиции клиента число линейных ролл-трейлеров должно быть достаточно большим для обеспечения бесперебойности перевозочного процесса. В то же время избыточность парка оборудования нежелательна для линии.

Сущность предлагаемого решения проблемы заключается в том, чтобы при отсутствии возможности стоимостного выражения оптимизационной модели (приведённой в статье [10]), используя только «натуральные» показатели (время ожидания обслуживания, величина резервов), установить компромиссное рациональное решение путём выявления области пересечения взаимных интересов сторон. Рассматриваемый в данной статье принцип отыскания компромиссного взаимодовлетворяющего результата реализует двойственный подход к исследованию производственного (транспортного перевозочного) процесса случайного характера. В основу двойственного алгоритма решения заложена возможность переосмысления и переобозначения входящего и обслуживающего потоков, как показано на рис. 2.

В двойственной трактовке модели, дополнительно к традиционной, присутствует характеристика эффективности — среднее время ожидания обслуживающей стороной загрузки $\bar{t} = R/\mu$. В ходе алгоритма предлагается проведение расчётов применительно к двум вариантам видения проблемы — с позиции клиента и с позиции линии. Исходя из установленного параметра интенсивности грузопотока (λ или μ , см. рис. 2) и задаваясь различными значениями $\bar{t}_{\text{ожид}}$ по приведенным формулам можно определить параметр потока оборудования и все характеристики эффективности системы как промежуточный шаг вычислений. Результирующее рациональное решение находится в области «баланса» интересов обеих сторон (по сопоставимости характеристик эффективности) и ограничено двусторонними оценками снизу и сверху.

Пример выявления рационального компромиссного решения для одной группы линий компании «ДФДС Сивейз» (без учёта кооперации) приводится в табл. 1 и 2 (сопоставляемые характеристики эффективности обозначены одним цветом).

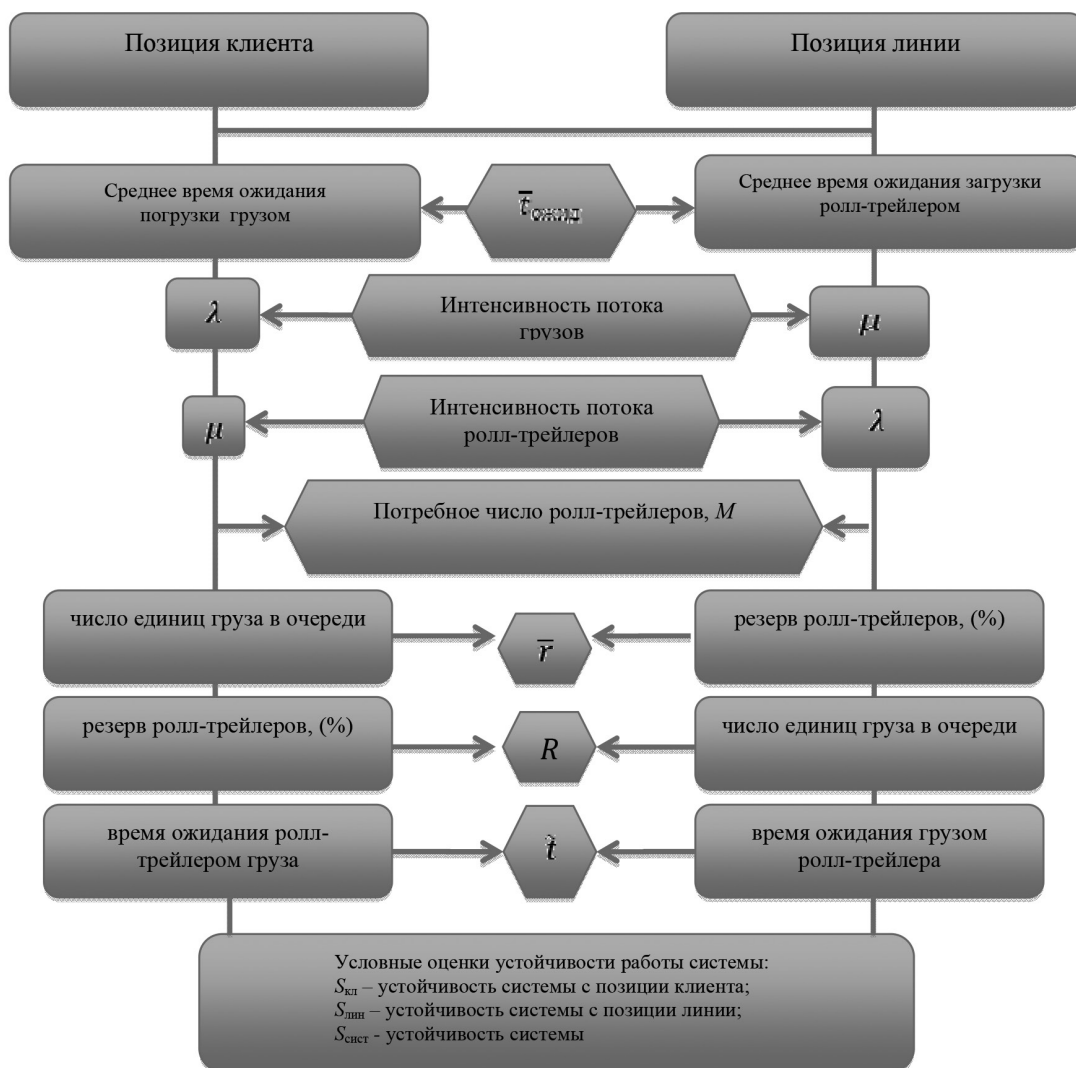


Рис. 2. Обозначение параметров и характеристик эффективности двойственной модели

Таблица 1

Результаты расчёта рациональной численности парка ролл-трейлеров линии 1:
Санкт-Петербург – Карлсхамн – Киль

Позиция клиента		Позиция линии	
$\bar{t}_{\text{ожид}}, \text{сут}$	1	$\bar{t}_{\text{ожид}}, \text{сут}$	1,5
μ	11,02	λ	9,47
$\bar{r}$	10,1	M	132,64
M	154,23	$\bar{r}$	14,21
R	12,83	$\bar{r}, \%$	10,71
$R, \%$	8,32	R	8,76
$\tilde{t}$	1,17	$\tilde{t}$	0,87
$S_{\text{линии}}$	91,68	$S_{\text{линии}}$	89,29
$S_{\text{кли}}$	85,71	$S_{\text{кли}}$	87,62
$S_{\text{сист}}$	88,70	$S_{\text{сист}}$	88,45

Количество ролл-трейлеров линии 1: $M'_1 = \frac{M_1 + M_2}{2} = \frac{154,23 + 132,64}{2} = 144$.

Таблица 2

**Результаты расчёта рациональной численности парка ролл-трейлеров линии 2:
Усть Луга – Засниц – Киль**

Позиция клиента		Позиция линии	
$\bar{t}_{\text{ожид}}, \text{сут}$	4,5	$\bar{t}_{\text{ожид}}, \text{сут}$	4,5
μ	0,67	λ	0,35
$\bar{r}$	2,25	M	4,85
M	9,33	$\bar{r}$	1,56
R	2,33	$\bar{r}, \%$	32,14
$R, \%$	25,00	R	2,15
$\tilde{t}$	3,50	$\tilde{t}$	4,31
$S_{\text{лин}}$	75,00	$S_{\text{лин}}$	67,86
$S_{\text{кл}}$	35,71	$S_{\text{кл}}$	38,46
$S_{\text{сист}}$	55,36	$S_{\text{сист}}$	53,16

Количество ролл-трейлеров линии 2: $M'_2 = \frac{M_1 + M_2}{2} = \frac{9,33 + 4,85}{2} = 8$.

Как видно из данных табл. 2, оценки условной устойчивости работы линии 2 ниже, чем линии 1. Это объясняется тем, что вследствие резко выраженной несбалансированности экспортных и импортных грузопотоков линии 2 она в определённой мере является «слабым звеном» в группе.

Результат применения модели для определения рационального количества ролл-трейлеров группы линий 1 и 2, исходя из принципа кооперированного управления их ресурсами, приведён в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты расчёта рациональной численности парка ролл-трейлеров
группы линий 1 и 2 при кооперации ресурсов**

Позиция клиента		Позиция линии	
$\bar{t}_{\text{ожид}}, \text{сут}$	1	$\bar{t}_{\text{ожид}}, \text{сут}$	1
M	11,52	λ	9,69
$\bar{r}$	10,6	M	111,39
M	132,48	$\bar{r}$	9,69
R	10,58	$\bar{r}, \%$	8,70
$R, \%$	7,99	R	10,51
$\tilde{t}$	0,92	$\tilde{t}$	0,99
$S_{\text{лин}}$	92,01	$S_{\text{лин}}$	91,30
$S_{\text{кл}}$	85,71	$S_{\text{кл}}$	85,84
$S_{\text{сист}}$	88,86	$S_{\text{сист}}$	88,57

Количество ролл-трейлеров группы линий при кооперации ресурсов

$$M' = \frac{M_1 + M_2}{2} = \frac{132,48 + 111,39}{2} = 122.$$

Сравнение результатов наглядно демонстрирует существенное уменьшение потребного числа ролл-трейлеров при их кооперированном использовании. Кроме того, в результате кооперации в целом по группе линий наблюдаются высокие оценки устойчивости обеих сторон процесса как линейной компании, так и клиента, несмотря на условно «слабое звено», представляемое линией 2.

Выводы:

- в статье решается вопрос определения рациональной численности ролл-трейлерного парка линейной компании с применением теории систем массового обслуживания;
- представлена специфическая трактовка модели массового обслуживания, реализующая двойственный подход к исследованию транспортного процесса случайного характера;
- разработанный двойственный алгоритм модели позволяет отыскать компромиссное рациональное решение, удовлетворяющее интересы обеих сторон процесса – линии и клиентуры;
- в целях повышения эффективности управления ролл-трейлерным оборудованием компании предлагается кооперированное использование ресурсов отдельных линий;
- теоретическое изыскание иллюстрируется численными примерами, отражающими конкретную производственную ситуацию.

Таким образом, содержание статьи не только восполняет существующий ныне пробел в научной литературе сферы эксплуатации морского транспорта, но и может быть полезным для практической деятельности.

Список литературы

1. Рыжиков Ю. И. Опыт расчёта сложных систем массового обслуживания / Ю. И. Рыжиков, А. В. Уланов // Информационно-управляющие системы. — 2009. — № 2. — С. 56–61.
2. Голышева Н. М. Система обслуживания транспортных потоков с возможностью наложения очередей / Н. М. Голышева // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2013. — № 4. — С. 220–224.
3. Häggström O. Finite Markov chains and algorithmic applications / O. Häggström. — Cambridge University Press, 2002. — Т. 52.
4. Yamade T. Optimizing the handling capacity in a container terminal for investigating efficient handling systems / T. Yamade [et al.] // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. — 2003. — Т. 5. — № 1. — Pp. 597–608.
5. Kuo T. C. A case study of inter-arrival time distributions of container ships / T. C. Kuo [et al.] // Journal of Marine science and technology. — 2006. — Т. 14. — № 3. — Pp. 155–164.
6. Mavrakis D. A queueing model of maritime traffic in Bosphorus Straits / D. Mavrakis, N. Kontinakis // Simulation Modelling Practice and Theory. — 2008. — Т. 16. — № 3. — Pp. 315–328.
7. Oyatoye E. O. Application of Queueing theory to port congestion problem in Nigeria / E. O. Oyatoye et al // European Journal of Business and Management. — 2011. — Т. 3. — № 8. — Pp. 24–36.
8. Lechman R.C. Application of the queueing models in elasticity analysis / R. C. Lechman, P. Jula // Transportation Research, 2011. — Part E47. — Pp. 992–1004.
9. Прокофьев В. А. Управление работой морского флота: учеб. пособие. / В. А. Прокофьев, Т. А. Вепринская. — СПб.: Изд-во ГМА имени адмирала С. О. Макарова, 2010. — С. 240.
10. Вепринская Т. А. Применение модели массового обслуживания в методе рационального управления ресурсами компании на примере транспортного оборудования РО-РО линии / Т. А. Вепринская, З. А. Панасенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 3–6.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ И ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ СУДОХОДСТВА

ANALYSIS OF THE SYSTEM AND THE ORGANIZATIONAL STRUCTURE OF SHIPPING NAVIGATION AND HYDROGRAPHIC SUPPORT MANAGEMENT

В статье рассмотрена национальная система управления навигационно-гидрографическим обеспечением судоходства (УНГОС) на современном этапе развития водного транспорта. На основании обобщения положений нормативно-законодательных актов выполнена дифференциация сфер влияния Министерства транспорта и Министерства обороны РФ и конструктивно выделено три уровня управления (федеральный, региональный, местный) в исследуемой области. На каждом уровне управления проанализирована деятельность государственных структур и коммерческих организаций с уточнением возложенных полномочий и сфер ответственности. Наиболее детально систематизирована иерархия основных государственных задач и функций УНГОС, закрепленных за Министерством транспорта, Федеральным агентством морского и речного транспорта и подведомственными ему организациями. Выявлены области деятельности частного бизнеса и его взаимодействие с государственными структурами. Обоснованно сделан вывод о сложившейся вертикально-интегрированной структуре УНГОС, соответствующей современному этапу развития государственного управления водным транспортом.

The article deals with the national management system of navigational and hydrographic support of shipping (UNGOS) at the present stage of development of water transport. On the basis of generalization of the existing legislative acts differentiation of the spheres of influence of the Transport Ministry and the Defence Ministry is made. Three levels of government (federal, regional, local) are structurally identified in the study area. At each level of management the activities of government bodies and commercial organizations are analyzed to clarify their powers and responsibilities. Created the most detailed systematic hierarchy of key government objectives and functions of UNGOS assigned to the Transport Ministry of the Russian Federation, Federal Agency of Sea and River transport and its subordinate organizations. Identified areas of private business and its interaction with the state structures. Justified the conclusion about the currently existing vertically integrated structure of UNGOS corresponding to the present stage of development of the state water transport management.

Ключевые слова: управление, навигационно-гидрографическое обеспечение судоходства, организационная структура, организационно-правовая форма, полномочия, ответственность, функции, задачи, иерархичность, государственно-частное партнерство, безопасность судоходства.

Key words: management, navigation and hydrographic support for shipping, organizational structure, legal form, powers, responsibilities, functions, objectives, hierarchy, public-private partnership, navigation security.

В НАСТОЯЩЕЕ время в России сложилась определенная система управления навигационно-гидрографическим обеспечением судоходства, представляющая комплекс взаимодействующих структур с распределенными между ними функциями, полномочиями и порядком их взаимодействия на федеральном, региональном и локальном уровнях управления. Рассматриваемая система характеризуется рядом признаков, среди которых: целостность – все элементы управления служат общей цели, стоящей перед системой управления; иерархичность – каждый элемент системы рассматривается как подсистема более сложной системы управления; взаимозависимость системы и среды – система формируется в общей системе управления водным транспортом.

Конструктивно исследуемая система реализуется в организационной структуре УНГОС на трех уровнях: федеральном, региональном и локальном.

Федеральный уровень. Проведенный анализ выявил, что на этом уровне управление навигационно-гидрографическим обеспечением (НГО) осуществляется двумя органами исполнительной власти:

- Министерством транспорта РФ с подведомственными ему Федеральным агентством морского и речного транспорта и Федеральной службой по надзору в сфере транспорта;
- Министерством обороны РФ в пределах своих компетенций.

Для эффективного взаимодействия министерств важно уточнить разграничение зон ответственности в рассматриваемой области.

В соответствии с Кодексом торгового мореплавания от 30.04.1999 г. № 81-ФЗ навигационно-гидрографическое обеспечение морских путей осуществляется Министерством обороны, для которого НГО морских путей является ключевым элементом для обеспечения национальной безопасности. НГО в акватории Северного морского пути, морских портов и на подходах к ним законодательно закреплено за Министерством транспорта РФ.

Навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов по внутренним водным путям (ВВП), за исключением участков пограничных зон РФ, выполняется администрациями бассейнов ВВП на основании Кодекса внутреннего водного транспорта от 07.03.2001 г. № 24-ФЗ.

Важно подчеркнуть, что как в Министерстве обороны, так и в Министерстве транспорта отсутствует единый государственный орган с самостоятельным административным статусом, отвечающим за НГО. У военных ответственность за поддержание системы навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности возложено на Управление навигации и океанографии (УНиО) МО РФ. В Минтрансе России функции НГО судоходства реализуются через Департамент государственной политики в области морского и речного транспорта (ДГП в ОМиРТ) и подведомственные органы – Федеральную службу по надзору в сфере транспорта и Федеральное агентство морского и речного транспорта [1].

В современной отечественной научной литературе изучению вопросов структуры управления навигационно-гидрографическим обеспечением судоходства посвящено большое количество работ в зависимости от исследуемой области применения. Так В. А. Катенин, А. В. Зернов [2] рассматривают УНГОС на внутренних водных путях, деятельность администраций бассейнов ВВП. Изучение УНГОС общего мореплавания частично находит отражение в работах В. С. Болдырева, С. П. Алексеева, А. Н. Добротворского [3] – [5]. В. И. Пересыпкин, изучая проблемы Северного морского пути [6], рассматривает вопросы УНГОС, возложенные на ФГУП «Гидрографическое предприятие».

Обобщая научные труды, с учетом ранее проведенного исследования [7], правомерно сделать вывод, что на современном этапе развития водного транспорта вопросы УНГОС отражены недостаточно широко и требуют более детального изучения.

В данной статье организационная структура управления НГО судоходства рассматривается в зоне ответственности и сфере компетенций Министерства транспорта РФ, которое является основным государственным органом, осуществляющим выработку государственной политики и нормативно-правовое регулирование области НГО судоходства (см. рис. на с. 148).

Деятельность ДГП в ОМиРТ, как структурного подразделения Министерства, направлена на формирование и реализацию единой политики, отраженной в Морской доктрине Российской Федерации на период до 2020 г., в которой отражены основные направления в области навигационно-гидрографического обеспечения судоходства [8]:

- выполнение научных исследований проблем навигационно-гидрографического обеспечения деятельности российского флота с целью обеспечения создания морских навигационных карт, руководств для плавания в любых районах Мирового океана, создание федерального фонда морской картографии и банка морских карт в электронно-цифровом виде;
- поддержание, совершенствование и развитие средств навигационно-гидрографического обеспечения, создание в РФ единой государственной гидрографической службы в целях обеспечения безопасности морской деятельности;

– поддержание и развитие системы навигационно-гидрографического обеспечения как одной из систем информационного обеспечения морской деятельности в целях интеграции и рационального использования комплексов и средств различного ведомственного подчинения для обеспечения и принятия решений в области морской деятельности.

Федеральная служба по надзору в сфере транспорта (Ространснадзор) является контролирующим органом, который через Управление государственного морского и речного надзора (Госморречнадзор) и подчиненных ему отделов (отдела надзора за судоходством и отдела надзора за портовой деятельностью, судоходными и портовыми гидротехническими сооружениями) выполняет свои функции на морском и речном транспорте, в том числе по соблюдению юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями, осуществляющим деятельность по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства обязательных требований законодательства и международных договоров Российской Федерации [9].

Например, за надлежащим содержанием судовых ходов и средств навигационного оборудования, включая проверку наличия и бесперебойной работы плавучих и береговых знаков на судовых ходах, мостах и гидросооружениях, согласование схемы расстановки навигационного оборудования на внутренних водных путях бассейна.

Федеральное агентство морского и речного транспорта (Росморречфлот) несет ответственность за непосредственное оказание государственных услуг в области навигационно-гидрографического обеспечения судоходства. В структуре агентства эти функции возложены на Управление обеспечения судоходства и Управление внутреннего водного транспорта, которые через свои подразделения (отдел обеспечения безопасности судоходства и порядка, отдел ледокольного обеспечения и гидрографии, отдел связи, навигации и научной деятельности, отдел пути и технического флота, отдел гидротехнических сооружений) организуют проведение необходимых мероприятий.

Непосредственно за деятельностью по организации навигационно-гидрографического обеспечения судоходства отвечают подведомственные Росморречфлоту: ФГУП «Росморпорт», ФГУП «Гидрографическое предприятие», ФГУП «Картографические и информационные системы», ФГКУ «Администрация Северного морского пути».

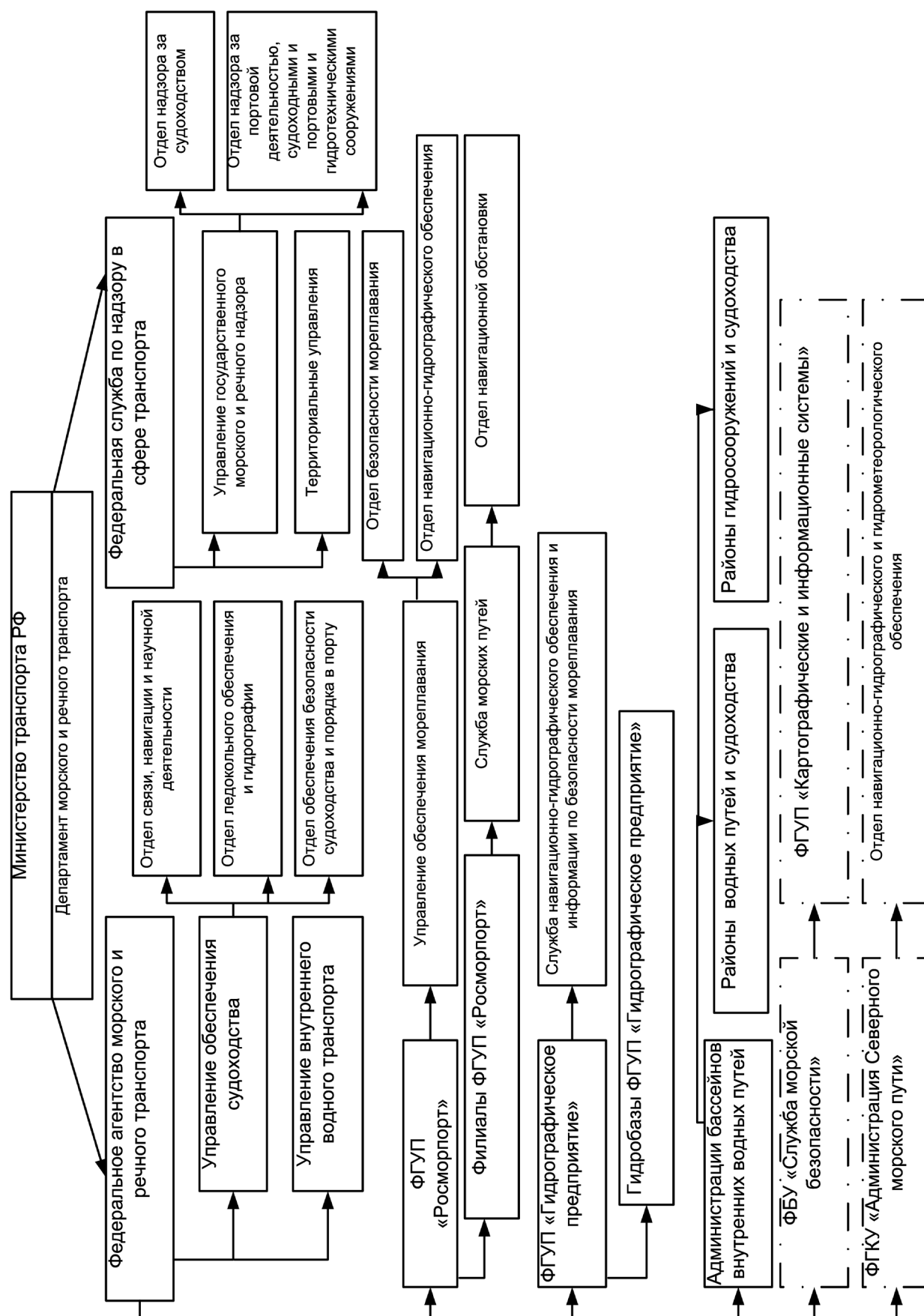
ФГУП «Росморпорт» является централизованной организацией по эффективному управлению, поддержанию и развитию инфраструктуры в морских портах; оказанию услуг заходящим в них судам; обеспечению безопасности мореплавания, включая НГО судоходства в портовых акваториях и на подходных каналах к ним. В структуре предприятия «Управление обеспечения мореплавания» и подчиненные ему «Отдел навигационно-гидрографического обеспечения судоходства», «Отдел безопасности мореплавания» отвечают за НГО плавания судов.

Единственным предприятием, созданным в целях организации деятельности по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства, является ФГУП «Гидрографическое предприятие», оказывающее государственные услуги в акватории Северного морского пути (СМП).

Комплексная система НГО безопасности судоходства акватории СМП ФГУП «Гидрографическое предприятие» осуществляется по следующим направлениям:

- изучение подводного рельефа Арктических морей в целях издания и корректуры современных морских навигационных карт, руководств и пособий для плавания;
- оборудование акватории СМП современными средствами навигационного оборудования, включая спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС/GPS в дифференциальном режиме;
- оперативное информирование мореплавателей об изменениях в навигационной обстановке, включая районы НАВАРЕА XX и XXI.

На 83-й сессии Комитета по безопасности судоходства (КБМ) Международной морской организации (ИМО) принято решение о создании на район Северного Ледовитого океана двух районов XX и XXI НАВАРЕА, относящихся к зоне ответственности России. Для выполнения, возложенных на РФ международных обязательств Гидрографическое предприятие является национальным координатором по сбору, подготовке и передаче информации по безопасности мореплавания на географические морские районы НАВАРЕА XX и XXI.



Для решения поставленных задач предприятие располагает гидрографическим флотом, в составе десяти судов, возраст которых 30 и более лет.

Организационная структура предприятия включает восемь филиалов, комплексную гидрографическую экспедицию, картографическое производство, объединенный арктический радионавигационный отряд, арктическую службу средств навигационного оборудования и радиационной безопасности, службу навигационно-гидрографического обеспечения и информации по безопасности мореплавания.

В системе государственного управления НГО судоходства произошли существенные изменения. Воссоздана «Администрация Северного морского пути», создан картографо-геодезический фонд Росморречфлота с возложением функции фондодержателя на ФБУ «Служба морской безопасности».

Федеральное государственное казенное учреждение «Администрация Северного морского пути» обеспечивает доступ в акваторию СМП российским и иностранным судам и организует плавание в закрепленной акватории СМП, включая [10]:

- мониторинг навигационной обстановки;
- согласование установки средств навигационного оборудования и районов проведения гидрографических работ;
- предоставление информационных услуг в области навигационно-гидрографического обеспечения плавания судов.

Навигационно-гидрографическое обеспечение плавания судов в акватории СМП осуществляется в соответствии с гл. VI Правил плавания в акватории СМП, утвержденных приказом Минтранса России № 7 от 17.01.2013 г. На основании этого документа можно сказать, что «Администрация СМП» является согласовательной структурой, курирующей вопросы безопасности плавания в акватории. Тогда как проведенный ретроспективный анализ организации деятельности «Администрации СМП» при Министерстве морского флота СССР, показывает, что исполнение обязанностей по осуществлению навигационно-гидрографического обслуживания судов, плавающих по Северному морскому пути, было возложено на «Администрацию СМП» [11]. В настоящее время непосредственной деятельностью по осуществлению НГО судоходства осуществляется ФГУП «Гидрографическое предприятие» с определенными условиями согласования с «Администрацией СМП».

ФГУП «Картографические и информационные системы» осуществляет функции по организации сбора, размещения, учета, хранения и распространения фондовых материалов. Администрации бассейновых внутренних водных путей, ФГУП «Гидрографическое предприятие», ФГУП «Росморпорт» являются региональными отделениями фонда в границах зон ответственности за навигационно-гидрографическое обеспечение судоходства. Все созданные региональными отделениями электронные карты подлежат включению в фонд.

Региональный уровень характеризуется деятельностью филиалов федеральных предприятий и учреждений в регионах и бассейнах водного транспорта.

Территориальные управления Госморречнадзора расположены в 14 федеральных округах Российской Федерации, осуществляют функции по контролю и надзору за соблюдением законодательства РФ в деятельности по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства в пределах границ зон своей ответственности.

Филиалы ФГУП «Росморпорт», расположенные на территории 16 субъектов Российской Федерации, представляют собой обособленные подразделения, осуществляющие деятельность в закрепленных морских портах и на подходах к ним. Находящиеся в различных регионах России, руководствуясь принципами единой политики предприятия, они обеспечивают НГО судоходства в зоне своей ответственности через созданные в них Службы навигационно-гидрографического обеспечения (Службы морских путей).

Филиалы ФГУП «Гидрографическое предприятие» представлены восемью гидрографическими базами, осуществляющими деятельность по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства акватории Северного морского пути в пределах отведенных границ.

ФГКУ «Администрация Северного морского пути» на региональном уровне представлено одним филиалом, расположенным в г. Архангельск.

На бассейновом уровне ответственность за НГО судоходства возложена на Администрации бассейнов внутренних водных путей (АБВВП), обеспечивающих безопасность судоходства в портовых и межпортовых акваториях с необходимым надзором и контролем. В настоящее время создано 14 АБВВП, охватывающих все внутренние водные пути государства: Азово-Донской, Амурский, Байкало-Ангарский, Беломорско-Онежский, Волго-Балтийский, Волжский, Волго-Донской, Енисейский, Камский, Ленский, Обский, Обь-Иртышский, Печорский, Северо-Двинский бассейны.

Администрации и входящие в их состав структурные подразделения (районы водных путей и районы гидротехнических сооружений и судоходства) реализуют задачи по НГО на внутренних водных путях. Службы пути, гидросооружений, обеспечения безопасности судоходства, картографии проводят необходимый комплекс работ в исследуемой области.

Локальный уровень управления представлен частными предприятиями и организациями, осуществляющими определенный вид деятельности: по гидрографическому обследованию, обслуживанию средств навигационного оборудования, проведению ремонтных дноуглубительных работ и т.д. Так, на Северо-Западе активно работают: ООО «Петрослав Гидросервис», ООО «Фертоинг», ООО «Гидробалт» и др.

На примере Северного бассейна (Мурманского филиала ФГУП «Росморпорт») в результате комплексных работ на акватории морского торгового порта Мурманск компанией ООО «Петрослав Гидросервис» был собран весь комплекс данных для корректуры действующих навигационных морских карт, руководств и пособий, проведен навигационно-гидрографический мониторинг акватории, выявлены наименьшие глубины и навигационные опасности.

В Северо-Западном бассейновом филиале компаний ООО «Гидробалт» было проведено гидрографическое обеспечение дноуглубительных работ по строительству акватории порта Высоцк, площадное гидрографическое обследование порта Усть-Луга.

Выполненные исследования позволили систематизировать основные задачи и функции государства в области навигационно-гидрографического обеспечения судоходства, что представлено в табл. 1.

Таблица 1

**Иерархия основных задач и функций государства
в области навигационно-гидрографического обеспечения судоходства**

1. Министерство транспорта РФ	
1.1.	<i>Департамент государственной политики в области морского и речного транспорта</i>
	Задачи: – выработка государственной политики в области морского и внутреннего водного транспорта; – разработка проектов нормативных правовых актов по вопросам регулирования деятельности морского и внутреннего водного транспорта; – координация деятельности Федеральной службы по надзору в сфере транспорта (в части морского и внутреннего водного транспорта), Федерального агентства морского и речного транспорта
	Функции: – участие в реализации «Морской доктрины Российской Федерации на период до 2020 года»; – разработка предложений по совершенствованию системы управления в области морского и внутреннего водного транспорта в части НГО судоходства; – разработка предложений по оптимальному использованию морских и внутренних водных путей, включая Северный морской путь, в рамках единой российской транспортной системы; – участие в разработке, анализе применения и внесении изменений в акты в области морского и внутреннего транспорта, в том числе устанавливающие порядок одобрения типов навигационной и связной аппаратуры и подписание свидетельств на одобрение типа изделия

Таблица 1
(Продолжение)

2. Федеральное агентство морского и речного транспорта	
2.1.	<i>Управление обеспечения судоходства</i>
	Задачи: – обеспечение безопасности судоходства и порядка в морских портах РФ; – организация ледокольного и гидрографического обеспечения в акватории Северного морского пути, акваториях морских портов и на подходах к ним
	Функции: – организация проведения мероприятий по безопасности мореплавания в морских портах и на подходах к ним, а также по безопасности судоходства на внутренних водных путях; – организация проведения работ по навигационно-гидрографическому обеспечению условий плавания судов в акватории Северного морского пути, акваториях морских портов, на подходах к ним; – организация подготовки и издания карт и схем, руководств, лоций, наставлений для плавания, описаний огней, знаков, радиотехнических средств, для обеспечения безопасности плавания по внутренним водным путям, в акватории Северного морского пути, в акваториях морских портов, на подходах к ним
2.2.	<i>Отдел обеспечения безопасности судоходства и порядка в порту</i>
	Задачи: – организация и оказание услуг по обеспечению безопасности судоходства в море, на внутренних водных путях РФ, в акваториях морских и речных портов, и на подходах к ним
	Функции: – организация проведения работ по навигационному обеспечению условий плавания судов в акваториях морских портов и подходах к ним; – организация выполнения мероприятий по обеспечению безопасности судоходства в море, на внутренних водных путях РФ, в акваториях морских и речных портов
2.3.	<i>Отдел ледокольного обеспечения и гидрографии</i>
	Задачи: – организация оказания услуг по ледокольному обеспечению судоходства в акватории Северного морского пути, в замерзающих морских портах и по внутренним водным путям; – организация оказания услуг по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства в акватории Северного морского пути, в акваториях морских портов и подходах к ним
	Функции: – организация ледокольного обеспечения судоходства; – организация работы по навигационно-гидрографическому обеспечению условий плавания судов в акватории Северного морского пути, в акваториях морских портов и подходах к ним
2.4.	<i>Отдел связи, навигации и научной деятельности</i>
	Задачи: – проведение единой технической политики в области средств связи и навигации на морском и речном транспорте; – организация научного обеспечения условий развития и безопасного функционирования морского и речного транспорта, также в части НГО судоходства; – организация определения приоритетных направлений развития науки и техники, осуществление координации научной и научно-технической деятельности, развития форм интеграции науки и производства, реализация достижений науки и техники на морском и речном транспорте
	Функции: – организация обобщения опыта эксплуатации средств связи и навигации на морском и речном транспорте; – организация разработки и своевременной корректуры нормативно-технических документов по связи и навигации и доведения их требований до подведомственных предприятий и учреждений; – организация проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в области связи, навигационного обеспечения на морском и речном транспорте

Таблица 1
(Продолжение)

2.5.	<i>Управление внутреннего водного транспорта</i> <i>Отдел пути и технического флота</i> <i>Отдел гидротехнических сооружений</i>
	Задачи: – организация содержания внутренних водных путей, судоходных гидротехнических сооружений на них и подходов к причалам общего пользования; – установление и организация выполнения гарантированных габаритов соответствующих судовых ходов, категорий средств навигационного оборудования, сроков работы этих средств и судоходных гидротехнических сооружений на внутренних водных путях
	Функции: – организация работы подведомственных Росморречфлоту учреждений и предприятий по проведению дноуглубительных, выправительных, дноочистительных, тральных и изыскательских работ для обеспечения судоходства на внутренних водных путях; – организация работы подведомственных Росморречфлоту организаций по навигационно-гидрографическому обеспечению условий плавания судов по внутренним водным путям, в акваториях речных портов за исключением участков пограничных зон Российской Федерации, а также по содержанию судоходных гидротехнических сооружений; – подготовка и представление на рассмотрение руководству Росморречфлота предложения по установлению гарантированных габаритов соответствующих судовых ходов, категорий средств навигационного оборудования, сроков работы этих средств и судоходных гидротехнических сооружений на внутренних водных путях
	3. ФГУП «Росморпорт»
3.1.	<i>Управление обеспечения мореплавания</i> <i>Отдел навигационно-гидрографического обеспечения</i> <i>Отдел безопасности мореплавания</i> Задачи: – содействие развитию морской транспортной инфраструктуры РФ, повышению конкурентоспособности российских морских портов путем эффективного использования, и развития закрепленного за предприятием федерального имущества в морских портах; – оказание услуг по обеспечению безопасности мореплавания в акваториях морских портов и на подходах к ним
	Функции: – осуществление безопасной эксплуатации закрепленных за ним систем обеспечения безопасности, объектов портовой инфраструктуры и др; – поддержка в надлежащем техническом состоянии, обеспечение функционирования, осуществление модернизации и нового строительства систем обеспечения безопасности мореплавания, в том числе расположенных на акваториях и территориях морских портов и на подходах к ним; – оказание всех видов услуг судам на подходах и непосредственно в акватории морских портов по их безопасному судоходству, маневрированию и стоянке, в частности: - осуществление лоцманской проводки судов; - обеспечение ледокольной проводки судов; - обеспечение безопасной стоянки судов в порту; - обеспечение картографической продукцией; – осуществление деятельности по навигационно-гидрографическому обеспечению плавания судов в акваториях морских портов и на подходах к ним
	4. ФГУП «Гидрографическое предприятие»
4.1.	<i>Служба навигационно-гидрографического обеспечения и информации по безопасности мореплавания</i> Задачи: – осуществление навигационно-гидрографического обеспечения в акватории Северного морского пути; – оказание государственных услуг в акватории Северного морского пути

Таблица 1
(Окончание)

	Функции: – организация проведения комплексных работ по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства в акватории Северного морского пути
	5. Администрации бассейнов внутренних водных путей
5.1.	<i>Служба пути</i> <i>Служба гидротехнических сооружений</i> <i>Служба обеспечения безопасности</i> <i>Служба картографии</i>
	Задачи: – осуществление функций по выполнению государственных работ и оказанию государственных услуг в сфере внутреннего водного транспорта
	Функции: – эксплуатация и развитие ВВП и гидротехнических сооружений; – обеспечение судоходства на ВВП, безопасности судоходных гидротехнических сооружений; – осуществление навигационно-гидрографического обеспечения условий плавания судов и путевых работ на внутренних водных путях

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что формирование системы управления навигационно-гидрографическим обеспечением судоходства неразрывно связано с изменениями, происходящими в системе управления водного транспорта.

Анализ последних изменений, касающихся вступивших в силу поручений Правительства об изменении правой формы ФГУП до 2018 г. в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 327 от 15 апреля 2014 г., находят отражение в изменении правовых форм предприятий, подведомственных Росморречфлоту. Для ФГУП «Росморпорт» и ФГУП «Гидрографическое предприятие» как основных предприятий навигационно-гидрографического обеспечения судоходства в акваториях СМП, морских портов и на подходах к ним предполагаются изменения в части организационно-правовых форм.

Планируемое изменение ФГУП «Гидрографическое предприятие» на ФКУП проходит этап согласования и утверждения устава в Правительстве РФ.

Изменение структуры ФГУП «Росморпорт» планируется на основании представленной долгосрочной программы инновационного развития предприятия. После рассмотрения федеральным органом исполнительной власти и проведенного Минэкономразвития и Росимуществом всестороннего анализа возникающих рисков исполнения программы, ее финансовой устойчивости, выполнимости целевых показателей и эффективности, программа направляется на рассмотрение Правительственной комиссии [12].

Изменение организационно-правовых форм позволит предприятиям наиболее рационально управлять своими ресурсами, извлекать максимальную выгоду из своей деятельности, что будет способствовать повышению эффективности деятельности предприятий по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства.

Вывод

Система управления навигационно-гидрографическим обеспечением судоходства в РФ представлена вертикально-интегрированной структурой, соответствующей современному этапу развития государственного управления водным транспортом. Министерство транспорта РФ осуществляет стратегическое нормативно-правовое управление системой НГО судоходства в акваториях морских портов и на подходах к ним, в акватории Северного морского пути, а также в акваториях речных портов и на внутренних водных путях. Федеральное агентство морского и речного транспорта реализует государственную политику в данной области через подведомственные ор-

ганизации, осуществляющие оказание государственных услуг, с привлечением частных организаций на локальном уровне.

Функции Ространснадзора по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства слабо отражены, преимущественно идет надзор за документами предприятий, осуществляющих деятельность по НГО судоходства.

Частный бизнес выполняет определенный вид деятельности по навигационно-гидрографическому обеспечению судоходства, а именно: гидрографическому обследованию акваторий и каналов, обслуживанию средств навигационного оборудования в акватории морских портов, проведению ремонтных дноуглубительных работ на подходных каналах и др.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что сложившаяся система управления навигационно-гидрографическим обеспечением судоходства недостаточно использует возможности интеграции государственного регулирования и инициативы частного бизнеса.

Необходимо шире использовать принципы и преимущества государственно-частного партнерства при обосновании сферы и особенностей его применения в рассматриваемой области. Это положительно отразится, с одной стороны, на рациональном использовании ресурсов, с другой – за счет развития конкурентной среды будет способствовать инвестиционной привлекательности предпринимательства для выполнения навигационно-гидрографических работ и услуг.

Кроме того, дальнейшее совершенствование системы управления НГО судоходства как со стороны государственных органов, так и хозяйствующих субъектов должно быть направлено на обеспечение надежности и безопасности работы флота на подходных каналах, акваториях морских портов, акватории Северного морского пути — с учетом территориальных особенностей.

Список литературы

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. № 395 «Об утверждении Положения о Министерстве транспорта Российской Федерации». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=179486> (дата обращения — 15.03.2015).
2. Катенин В. А. Навигационно-гидрографическое обеспечение судоходства на внутренних водных путях. / В. А. Катенин, А. В. Зернов, Г. Г. Фадеев. — М.: МОРКНИГА. — 2010. — 344 с.
3. Болдырев В. С. Об организации навигационно-гидрографического обеспечения мореплавания / В. С. Болдырев, В. Я. Васильев, А. Н. Яковлев // Навигация и гидрография. — 2009. — № 28. — С. 41–47.
4. Алексеев С. П. Навигационно-гидрографическое обеспечение морской деятельности на современном этапе ее развития / С. П. Алексеев // Навигация и гидрография. — 2007. — № 24. — С. 9–15.
5. Добротворский А. Н. Развитие навигационно-гидрографического обеспечения — актуальный этап совершенствования морской деятельности / А. Н. Добротворский // Морской вестник. — 2007. — № 2 (22). — С. 56–59.
6. Пересыпкин В. И. Проблемы Северного морского пути / В. И. Пересыпкин. — М.: Наука. — 2006. — 581 с.
7. Лаврентьева Е. А. Анализ сущности организационно-экономического механизма управления навигационно-гидрографическим обеспечением судоходства / Е. А. Лаврентьева, Е. Г. Алексеева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 122–131.
8. Морская Доктрина Российской Федерации на период до 2020 года: руководящий документ (утвержден Президентом РФ от 27 июля 2001 г.) // Гарант: информационно-правовой портал, 2002. URL: <http://base.garant.ru/2160909/> (дата обращения — 25.03.2015 г.).
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. № 398 «Об утверждении Положения о Федеральной службе по надзору в сфере транспорта». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=173866> (дата обращения — 15.03.2015).

10. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 15.03.2013 г. № 358-р «О создании федерального государственного казенного учреждения «Администрация Северного морского пути». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=551667> (дата обращения — 15.03.2015).

11. Постановление Совета Министров СССР от 16.09.1971 г. № 683 «Вопросы, связанные с учреждением Администрации Северного морского пути при Министерстве морского флота». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=ESU;n=1386> (дата обращения — 15.03.2015).

12. Министр экономического развития Алексей Улюкаев. О порядке работы Правительства РФ с компаниями с госучастием. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://portnews.ru/news/174657/> (дата обращения — 04.03.2015).

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396

В. В. Сахаров,
д-р техн. наук, проф.;

А. А. Чертков,
канд. техн. наук, доц.;

С. В. Сабуров,
асп.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЯХ СРЕДСТВАМИ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

SIMULATION OF STATIONARY REGIMES IN ELECTRIC AND HYDRAULIC NETWORKS BY MEANS OF NONLINEAR PROGRAMMING

Современные электроэнергетические сети, открытые гидравлические и трубопроводные транспортные системы различного назначения характеризуются высокой размерностью, сложной зависимостью технологических параметров от режимов работы, внешних условий, что значительно усложняет разработку адекватных моделей и проведение машинных экспериментов для получения научно обоснованных конструктивных решений на стадии проектирования, модернизации и эксплуатации.

В основу разработки эффективных способов анализа и синтеза нелинейных сетей со сложной топологией положены технологии термодинамического моделирования, базирующиеся на топологической общности расчетных схем, а также на фундаментальном положении о движении транспортных сред по единым законам течения, сохранения массы и энергии.

Решение комплекса проблем потокораспределения в многоконтурных электрических и гидравлических сетях и системах составляет основу создания современных технологий моделирования гомогенных и гетерогенных сред в установившихся и переходных режимах, имеет широкий спектр приложений в различных сферах производства и, в первую очередь, на объектах водного транспорта различного назначения.

Рассматриваются модели и алгоритмы расчета стационарных режимов потокораспределения в многоконтурных гидравлических и электрических сетях на основе принципа наименьшего действия. Оптимизационные процедуры алгоритмизации вычислений реализуются с использованием инструментария Optimization Toolbox среды MatLAB. Приводятся примеры оценки вектора состояния стационарных режимов в электрических цепях с линейными и нелинейными емкостными элементами, а также потокораспределений в автономной гидравлической сети в классе экстремальных задач.

Modern electricity network, open hydraulic and pipeline transportation systems for various applications are characterized high dimensions, a complex technological parameters dependence connected with operating modes, external environment, that considerable complicates machine and experimental adequate models construction for science – based solutions in design, modernization and maintenance.

The basic for development nonlinear networks analysis and synthesis effective methods with complex topology founded on thermodynamic technology models with community design diagrams as well basic situation traffic environments with uniform mass and energy conservation laws.

Solutions to electrical and hydraulic flux – distribution networks problem is the basis for modeling electric and hydraulic networks modern technologies with homogenous and heterogeneous environments, steady – state and transient conditions and has a wide ranges applications in different production areas and water transport tools to various purposes.

Models and design algorithms for steady state hydraulic and electric networks regimes is considered based on the minimum energy principle. Optimization procedures for algorithmic solutions with using Optimization Toolbox realize in MatLAB. Examples for steady state vectors estimations in electrical and hydraulic networks that consists linear and nonlinear elements are considered. Stream distributing for autonomic hydraulic circuit as extreme solution is demonstrated.

Ключевые слова: модели, алгоритмы, гидравлические и электрические сети, принцип наименьшего действия, оптимизация.

Key words: models, algorithms, hydraulic and electrical networks, principle of least action, optimization.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ системы, открытые транспортные гидравлические системы, системы трубопроводного транспорта различного назначения, предназначенные для эффективной работы технологических объектов с различными принципами функционирования, нашли широкое применение на водном транспорте в качестве сетей, по которым производится тепло- и энергоснабжение, осуществляется подача воды, топлива, природного газа, различных технических жидкостей и смесей. Такие сети характеризуются, как правило, высокой размерностью, сложной зависимостью технологических параметров от режимов работы, внешних условий и требуют немалых усилий при построении моделей и проведении машинных экспериментов для получения научно обоснованных конструктивных решений на стадии проектирования, модернизации и эксплуатации. Для анализа и синтеза сетей, с учетом специфики их функционирования, созданы эффективные методы и алгоритмы, разработаны фундаментальные положения теории гидравлических цепей, опубликованные известными отечественными учеными (Меренковым А. П., Хасилевым В. Я. и др. [1], [2]) и получившие широкое признание как в нашей стране, так и за рубежом [9]. Логическим продолжением этих работ следует считать исследования, проводимые в настоящее время в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН и направленные на решение спектра проблем неравновесной термодинамики со структурами, содержащими не-newтоновские жидкости и сложные гетерогенные системы [3], [4], [7], [12]. Технологии термодинамического моделирования, базирующиеся на фундаментальных положениях второго закона термодинамики, определяющего универсальные принципы эволюции, равновесия и экстремальности, получили развитие и применяются для исследования свойств замкнутых и открытых систем, обратимых и необратимых процессов и явлений, связанных с переносом различных веществ, энергии и электрических зарядов в диссипативных макроскопических системах.

Важным направлением исследований является редукция сложных динамических процессов к состоянию равновесия, изучение принципов и явлений самоорганизации на основе общей технологии моделирования. Дальнейшее развитие технологии термодинамического моделирования должны получить в связи с широким спектром их практических приложений. К ним относятся трубопроводные и открытые гидравлические системы, сети и системы сетевой структуры, предназначенные для транспортируемых жидкостей, газов, различных энергоносителей и др. Такое разнообразие объясняется, прежде всего, топологической общностью расчетных схем, а также тем обстоятельством, что движение транспортируемых сред по элементам сетей подчиняется единым законам течения и сетевым законам сохранения энергии и массы.

К исключительно важным приложениям термодинамического моделирования на водном транспорте следует отнести комплекс проблем анализа стационарных и нестационарных потоко-распределений в многоконтурных гидравлических и гетерогенных системах с сосредоточенными и распределенными параметрами. Большой интерес представляют вопросы синтеза сетевых моделей стационарного изотермического потоко-распределения в приложении к открытым гидравлическим сетям, поскольку такие модели пригодны для поиска точек конечного равновесия, определяемых традиционными методами (невязок, путем решения нелинейных дифференциальных уравнений и др.) [9]. Сетевые термодинамические модели могут служить инструментом для исследования нестационарных технологических процессов речных землесосов при разработке перекаток и выполнении дноуглубительных работ на водных путях, поиска квазистационарных энергоэффективных режимов поддержания максимальной производительности по грунту при управлении грунтозабором и гидротранспортированием пульпы.

Технологии моделирования стационарных режимов в сетевых объектах и системах, базирующиеся на экстремальных принципах поиска равновесных состояний, позволяют существенно

дополнить количественное описание равновесных процессов, повысить эффективность и качество численных оценок рабочих параметров и расширить область приложений численных методов оптимизации к решению широкого класса практических задач с использованием компьютерных технологий.

Среди экстремальных принципов и технологий моделирования сетевых систем исключительно важным является принцип наименьшего действия, отражающий специфику поведения естественных сетей и позволяющий вести расчеты в сложных сетях с нелинейными характеристиками элементов (звеньев). Принцип основан на обобщении теоремы Д. К. Максвелла о наименьшем тепловом действии в электрических цепях на гидравлические сети. Обобщение позволило научно обосновать и расширить арсенал методов расчета потокораспределения в гидравлических сетях и системах, эффективно использовать для моделирования, наряду с традиционными принципами, методы анализа и синтеза нелинейных электрических цепей.

Остановимся кратко на моделировании стационарных режимов в электрических и гидравлических сетях с применением принципа наименьшего действия и компьютерных технологий.

Существующий арсенал корректных методов и моделей электрических цепей и динамических систем, приводящих к одним и тем же результатам, позволяет выбирать для расчета наиболее подходящий метод, с учетом топологии сети и эффективности применения стандартных функций вычислительных сред. В разветвленных сетях с большим числом ветвей и узлов система уравнений содержит множество неизвестных, и ее моделирование связано с выполнением значительного объема вычислительных операций и использованием обобщенных аналитических и топологических методов в различных вычислительных средах. Согласно теореме о принципе наименьшего действия, в любой системе проводников, где нет источников ЭДС, а токи отвечают закону Ома, тепло, генерируемое установившимся токораспределением, всегда меньше тепла, выделяемого токами, распределенными любыми другими способами, но согласующимися с условиями, определяемыми законами Кирхгофа. Важность этой теоремы исключительно велика в связи с тем, что она определяет взаимную связь задач математического программирования в электротехнике с аналогичными задачами потокораспределения в других средах, обладающих экстремальными свойствами расхода энергии на транспортирование.

Основанный на работах Максвелла и Кирхгофа экстремальный принцип потокораспределения в открытых гидравлических сетях может быть сформулирован в следующей форме: потоки в открытой гидравлической сети распределяются по ветвям (рукавам) таким образом, что этими потоками производится наименьшее количество теплоты. Энергия, затрачиваемая на транспортирование жидкости по сети из начальной в конечную точку, является величиной минимальной при соблюдении условия материального баланса во всех узлах сети (цепи). Очевидно, общность физических законов и методов динамических аналогий определяют практическое применение моделей сетей во многих физических системах и средах, а расчеты стационарных режимов, базирующиеся на минимизации энергии, позволяют получить высокую степень адекватности поведения модели и объекта. Согласно принципу минимизации энергии в аналитической механике, для всех возможных движений консервативной механической системы на любом временном интервале возникает такое движение, для которого функционал

$$J = \int_{t_a}^{t_b} L(t) dt, \quad (1)$$

называемый функционалом действия, принимает экстремальное (установившееся) значение. Функция $L(t)$ является функцией Лагранжа. Для линейной изолированной механической системы эта функция определяется соотношением

$$L = T_k - U_p, \quad (2)$$

где T_k — кинетическая энергия системы; U_p — потенциальная энергия, т.е. лагранжиан L является функцией положения системы и скорости.

В консервативной системе с голономными связями вектор переменных состояния $q(t)$ на временном интервале $[t_a, t_b]$ удовлетворяет принципу Гамильтона: $q(t)$ является экстремалью функционала J , если выполняется соотношение

$$\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = 0.$$

Для электрических цепей это условие имеет ограниченное применение. Например, его можно использовать для расчета цепей, состоящих только из емкостей с идеальными кулон-вольтными характеристиками. В общем же электрические цепи и сети не являются консервативными, поскольку в них часть энергии необратимо преобразуется в тепло. Для моделирования неконсервативных систем необходимо применять уравнение

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}} = Q,$$

где Q — обобщенные силы (внешние силы в механике или источники энергии в электрических цепях); R — диссипативная функция Рэлея. Экспериментально доказано, что для линейных электрических цепей и систем оценку диссипативной функции с достаточной точностью можно выполнить с помощью следующего соотношения

$$R = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m r_j (\dot{q}_j)^2,$$

где r_j — элемент параметра диссипации, т.е. резистор; $j = 1, \dots, m$.

Функция Рэлея для цепей, систем и сетей с нелинейными характеристиками диссипативных элементов является сложной и может оцениваться с помощью современных компьютерных средств аппроксимации (полиномов, степенных рядов, сплайнов, вейвлетов и др.).

Математическое моделирование, анализ алгоритмов и методов вычислений потокораспределения, выбор адекватных решаемым задачам вычислительных систем и компьютерных технологий с использованием принципа наименьшего действия составляют проблему редукции моделей движения транспортируемых сред к моделям покоя [6].

Если кинетическая и потенциальная энергии в уравнении (2), а также диссипативная функция моделируются квадратичными полиномами, то для расчетов минимизации энергии целесообразно использовать методы квадратичного программирования и соответствующие функции инструментария Optimization Toolbox среды MatLAB с соблюдением их синтаксиса [8]. Такими свойствами обладают линейные системы и цепи. Для расчета систем и электрических цепей, состоящих из нелинейных элементов, метод квадратичного программирования не применим, и требуется использовать другие альтернативные методы, адекватные анализируемым процессам с возможностями применения принципа наименьшего действия.

Рассмотрим электрическую цепь, представленную на рис. 1. Разветвленная цепь, подключенная к источнику постоянной ЭДС, состоит из пяти конденсаторов различной емкости [10].

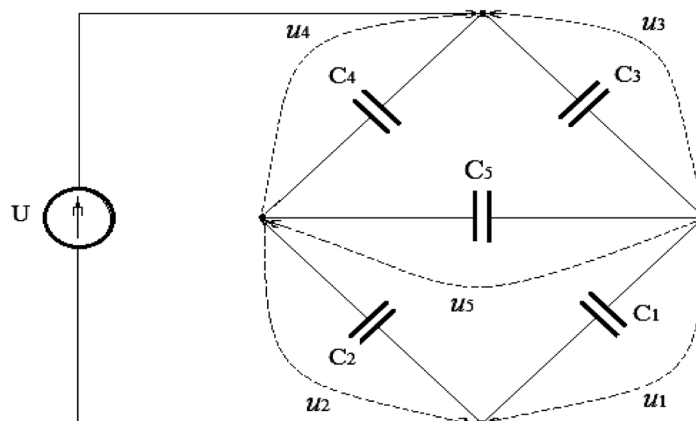


Рис. 1. Конденсаторная электрическая цепь

Согласно уравнению (2), стационарная точка для напряжений на емкостях цепи с линейными элементами может быть определена путем минимизации энергии электрического поля конденсаторов U_p при ограничениях, определяемых топологией цепи. Задача в терминах процедуры оптимизации формулируется следующим образом: оценить вектор состояния $U_C = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4 \ U_5]^T$, доставляющий минимум критерию качества

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 C_i U_i^2 \quad (3)$$

при ограничениях, составленных по законам Кирхгофа, с учетом принятых на рис. 1 обозначений напряжений на конденсаторах

$$A_{eq} \cdot U_C = b_{eq}, \quad (4)$$

где

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad b_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -U \end{bmatrix}.$$

Решение оптимизационной задачи выполнено при следующих значениях параметров цепи:

$$C_1 = 2 \text{ мкФ}; C_2 = 5 \text{ мкФ}; C_3 = 1 \text{ мкФ}; C_4 = 4 \text{ мкФ}; C_5 = 3 \text{ мкФ}.$$

Для расчетов по формулам (3) и (4) применена функция `fmincon` среды MatLAB. Результаты расчетов сведены в табл. 1, где в каждой строке представлены напряжения на ветвях цепи (рис. 1), соответствующие стационарным режимам при напряжениях U (В) источника ЭДС, приведенных в первом (левом) столбце. Минимальные значения критерия качества $J_{\min}$ для каждого режима — в правом столбце.

Таблица 1

Результаты расчетов напряжений на ветвях конденсаторной цепи

U	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$J_{\min}$
100	38,0952	42,8571	-61,9048	-57,1424	-4,7619	0,0290
200	76,1905	85,7142	-123,8095	-114,2895	-9,5238	0,1162
300	114,2858	128,5714	-185,7142	-171,4280	-14,2857	0,2614
400	152,3812	171,4285	-247,6188	-228,5715	-19,0474	0,4648
500	190,4762	214,2857	-309,5238	-285,7143	-23,8095	0,7262

Предположим, что вторая и пятая емкости (рис. 1) с кулон-вольтными характеристиками Q_{22} и Q_{52} заменены элементами с нелинейными характеристиками Q_{21} и Q_{51} , соответственно. Характеристики приведены на рис. 2.

Видно, что Q_{22} соответствует емкости $C_2 = 5 \text{ мкФ}$, а Q_{52} — емкости $C_5 = 3 \text{ мкФ}$. Для нелинейных элементов емкости изменяются в зависимости от напряжения и могут быть аппроксимированы следующими функциями:

— для Q_{21} $C_2(U) = (-6.1e - 06) \cdot u(2)^2 + 5 \cdot 1.0e - 06 \text{ (мкФ)}$;

— для Q_{51} $C_5(U) = (-2.5e - 06) \cdot u(5)^2 + 3 \cdot 1.0e - 06 \text{ (мкФ)}$.

Критерий качества (3), с учетом полученных зависимостей, будет иметь вид:

$$J_n = C_1 \cdot U_1^2 + C_2(U_2) \cdot U_2^2 + C_3 \cdot U_3^2 + C_4 \cdot U_4^2 + C_5(U_5) \cdot U_5^2. \quad (5)$$

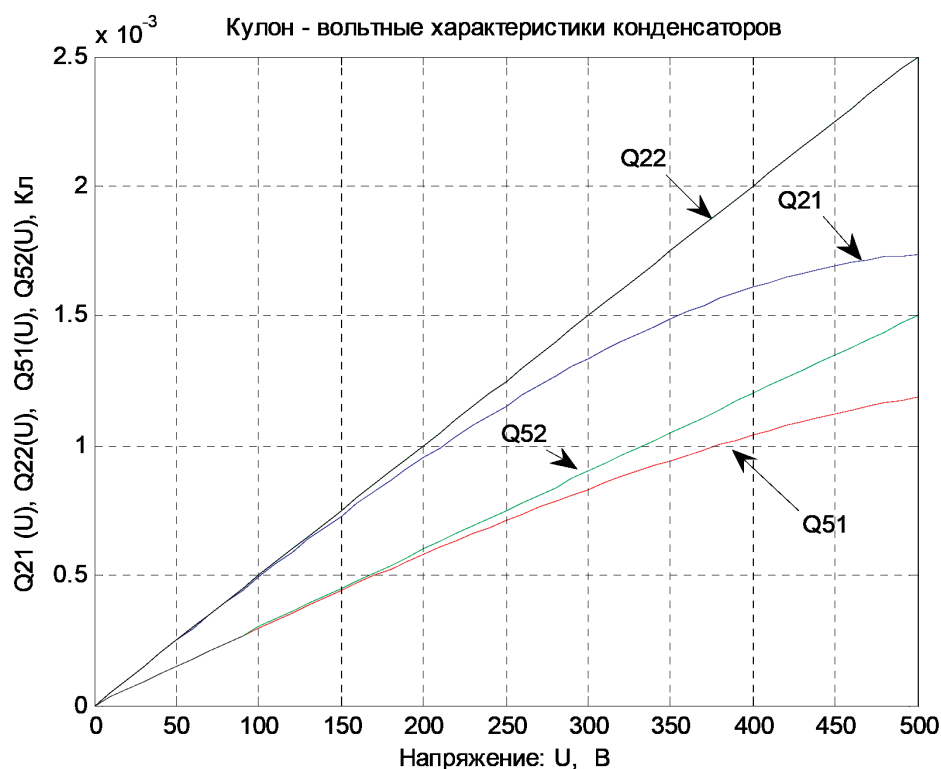


Рис. 2. Кулон-вольтовые характеристики емкостных элементов нелинейной цепи

Расчеты нелинейной цепи путем минимизации (5) при вариации U источника питания для пяти вариантов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения напряжений на элементах нелинейной цепи

U	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	J_n
100	38,0995	42,9802	-61,9005	-57,0198	-4,8807	0,0290
200	76,5355	86,4712	-123,4645	-113,5288	-9,9357	0,1159
300	115,5944	131,1925	-184,4056	-168,8075	-15,5982	0,2597
400	155,6466	177,9735	-244,3534	-222,0265	-22,3269	0,4591
500	197,3453	228,0697	-302,6547	-271,9303	-30,7245	0,7117

Из приведенных данных и рис. 2 видно, что с увеличением ЭДС источника влияние на равновесные режимы нелинейных элементов возрастает, а минимум J_n в сравнении с J линейной цепи уменьшается, что нетрудно определить по данным табл. 1 и 2.

Придавая большое значение вопросам применения принципа наименьшего действия для решения практически неограниченного спектра прикладных задач технико-экономического анализа и синтеза сетей различного назначения с использованием технологий термодинамического моделирования, кратко остановимся на методе расчета стационарного потокораспределения в гидравлических сетях и системах.

Рассмотрим простой пример расчета автономной гидравлической сети, представленной на рис. 3, и приведем вычислительный алгоритм, также базирующийся на функции `fmincon`. Для определенности технологические параметры (гидравлические сопротивления ветвей) примем равными значениям, приведенным в работе [5].

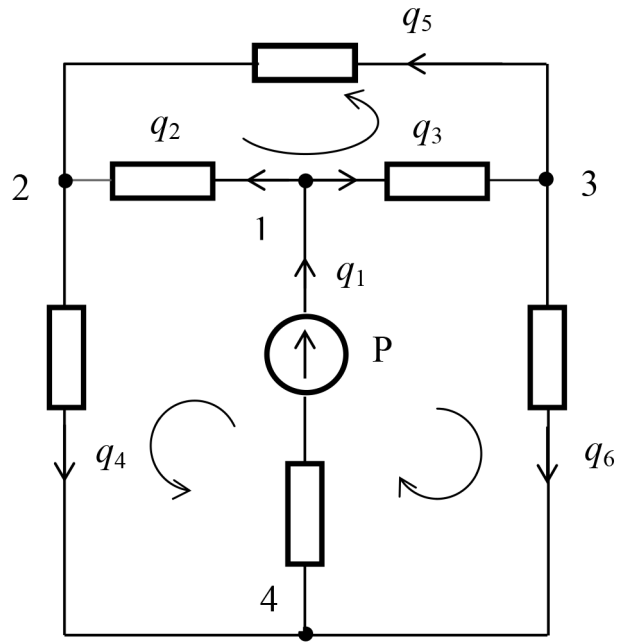


Рис. 3. Схема гидравлической сети с источником давления

Покажем, что вычислительный алгоритм для расчета нелинейной сети должен содержать нелинейные ограничения, способствующие повышению адекватности модели и конкретного технологического процесса.

Сеть содержит пять ветвей с указанными стрелками направлениями потоков. Нумерация узлов представлена числами 1, 2, 3 и 4. Введем нумерацию ветвей:

ветвь 1 расположена между узлами 1 и 2; 2 — между узлами 2 и 3; 3 — между узлами 2 и 4; 4 — между узлами 1 и 3; 5 — между узлами 3 и 4; 6 — соответственно, между узлами 1 и 4.

Расходы жидкости в ветвях обозначим вектором $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T$.

Введем вектор сопротивлений ветвей

$$a = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6] = [1.0e - 02 \ 1.56e - 03 \ 2.50e - 02 \ 1.25e - 02 \ 1.00e - 01 \ 4.22e - 01].$$

Для моделирования стационарных режимов потокораспределения примем степенную модель вида:

$$P_i = a_i \cdot q_i^{b_i}, \quad i = 1, \dots, 6, \quad (6)$$

где P_i — потери напора на i -ой ветви (аналог падения напряжения в электрической цепи).

Принято считать, что для ламинарных течений $b_i = 1$, а для турбулентных этот показатель степени в модели (6) равен 2. Чтобы расширить условия задачи, допустим, что существуют перекачиваемые жидкости, для которых b_i принимают значения $1 \leq b_i \leq 2$. Тогда можно ввести вектор b , элементами которого будут показатели степени модели (6) для всех ветвей:

$$b = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6] = [2 \ 1.7 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1.3].$$

С учетом (6), запишем критерий качества J_{TC} , отвечающий принципу наименьшего действия:

$$J_{TC} = a \cdot q^{[b+1]^T}. \quad (7)$$

Операцию минимизации (7) следует выполнять при соблюдении линейных и нелинейных ограничений. Линейные ограничения как уравнения неразрывности потоков запишем в следующем виде:

$$D_{eq} \cdot q = M_{eq},$$

где, исходя из топологии сети, согласно рис. 3, матрицы, входящие в уравнение (8), можно записать

$$D_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}; \quad M_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Нелинейные ограничения представим вектор-функцией, подлежащей «обнулению»:

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cdot q_1^{b_1} + a_2 \cdot q_2^{b_2} + a_4 \cdot q_4^{b_4} - P \\ a_2 \cdot q_2^{b_2} + a_3 \cdot q_3^{b_3} + a_5 \cdot q_5^{b_5} \\ a_1 \cdot q_1^{b_1} + a_3 \cdot q_3^{b_3} + a_6 \cdot q_6^{b_6} - P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Расчеты, выполненные путем минимизации (7) при соблюдении ограничений (8) и (9), представлены в табл. 3 для различных напоров, создаваемых перекачивающим насосом. В первом столбце таблицы приведены давления насоса P (МПа). В каждой строке указаны расходы в ветвях гидравлической сети q_i (м³/с). В последнем (правом) столбце приведены минимальные значения критерия $J_{гс}$, определенные в результате решения оптимизационной задачи.

Таблица 3

Расчетные значения расходов в ветвях гидравлической сети

P	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	$J_{гс}$
1,0	7,1313	6,0086	1,1228	6,0567	0,0482	1,0746	7,1313
1,5	8,8138	7,2873	1,5265	7,3622	0,0749	1,4516	13,2206
2,0	10,2458	8,3495	1,8963	8,4508	0,1013	1,7950	20,4916
2,5	11,5168	9,2743	2,2425	9,4015	0,1272	2,1152	28,7919
3,0	12,6726	10,1020	2,5707	10,2547	0,1528	2,4179	38,0179

Повышение эффективности и качества моделирования стационарных процессов потоко-распределения в сетях и сетевых системах различного назначения экстремальными методами с использованием компьютерных технологий представляет собой самостоятельную научную проблему, получившую важные приложения на водном транспорте. Приведенные расчетные примеры, базирующиеся на принципе наименьшего действия, свидетельствуют о возможности его использования для оценки параметров стационарных режимов в нелинейных электрических цепях и гидравлических сетях. Следует отметить, что метод применим для расчетов потоко-распределений в неавтономных сетях, природных открытых гидравлических сетях, каковыми являются водные пути с разветвленными участками рек и др. Метод и численные алгоритмы оптимизации пригодны для расчетов стационарных режимов в сетях и гидравлических системах высокой размерности с использованием принципов декомпозиции в нелинейном программировании.

Список литературы

1. Меренков А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. — М.: Наука, 1985. — 274 с.
2. Меренков А. П. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения / А. П. Меренков, Е. В. Сеннова, С. В. Сумароков [и др.]. — Новосибирск: Наука, 1992. — 405 с.
3. Каганович Б. М. Термодинамика теории цепей и их совместные приложения в энергетических исследованиях / Б. М. Каганович, Н. И. Воропай, В. А. Стенников [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2014. — № 5. — С. 3–15.

4. *Kaganovich B. M.* On the area of equilibrium thermodynamics application / B. M. Kaganovich, A. V. Kelko, V. A. Shamansky, I. A. Shirkalin // Proc. of ASME 2044 International Mech. Eng. Congress. November, 13 – 19. — Anaheim, California, USA — 2004. — С. 197–203.
5. *Сахаров В. В.* Балансовые модели и их применение в автоматизированных системах управления производством / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 46–53.
6. *Иванов Е. Н.* Способ расчета электрических цепей на основе квадратичного программирования / Е. Н. Иванов, А. В. Черничкова, М. Б. Шамсиева // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 67–71.
7. *Каганович Б. М.* Технология термодинамического моделирования. Редукция моделей движения к моделям покоя / Б. М. Каганович, А. В. Кейко, В. А. Шаманский [и др.]. — Новосибирск: Наука, 2010. — 236 с.
8. *Пригожин И. Р.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Р. Пригожин, Д. Кондепуди. — М.: Мир, 2002. — 461 с.
9. *Ottinger H. C.* Beyond Equilibrium Thermodynamics / H. S. Ottinger. — Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005. — 635 p.
10. *Дьяконов В. П.* Математические пакеты расширения MatLAB. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.
11. *Ахметзянов А. В.* Структурные модели стационарных процессов в нелинейных сетях / А. В. Ахметзянов, Л. И. Григорьев, С. В. Спиридонов // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2007. — № 3. — С. 37–48.
12. *Левин А. А.* Расчет потокораспределения в системе пылеприготовления ТЭС / А. А. Левин, Э. А. Таиров, В. Ф. Чистяков // Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем: сб. науч. тр. / Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. — М., 2010. — С. 114–122.

УДК 629.123:621.31

А. В. Григорьев,
канд. техн. наук, доц.;

Р. Р. Зайнуллин,
соиск.

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ ВАЛОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ И СИНХРОННЫМИ КОМПЕНСАТОРАМИ

ANALYSIS OF OPERATION MODES OF SHIP SHAFT GENERATOR PLANTS WITH FREQUENCY CONVERTERS AND SYNCHRONOUS COMPENSATORS

На современных транспортных судах широкое распространение получили валогенераторные установки. Применение полупроводниковых преобразователей частоты позволяет расширить их функциональные возможности и реализовать следующие режимы эксплуатации: автономный генераторный, генераторный параллельно с вспомогательными дизель-генераторами, автономный двигательный, двигательный совместно с главным двигателем. В состав традиционной схемы установки входят синхронный валогенератор, полупроводниковый преобразователь частоты и синхронный компенсатор. Анализ режимов ее эксплуатации проведен с использованием методов теории электрического поля и теории электрических цепей, в том числе метода баланса мощностей. В целях повышения технико-экономических показателей и надежности установок с полупроводниковыми преобразователями частоты в различных режимах эксплуатации разработаны требования к виду функции мощности от частоты вращения валогенератора, к рас-

пределению мощности при параллельной работе валогенератора и вспомогательного дизель-генератора, к порядку ввода и вывода оборудования из работы при снижении частоты вращения главного двигателя, к совместной работе полупроводникового преобразователя частоты и синхронного компенсатора и другие. Полученные математические зависимости могут быть использованы при проектировании с целью выбора структуры и параметров оборудования валогенераторных установок и разработке алгоритмов систем автоматического управления и регулирования.

Shaft generator plants got wide spread on modern transport ships. Using of semiconductor frequency converters lets to expand their functional capabilities and to realize following operation modes: single generating, generating in parallel with auxiliary diesel-generators, single driving, driving in combination with main diesel. Traditional scheme of plant consists of synchronous shaft generator, semiconductor frequency converter and synchronous compensator. Analysis of operation modes of plant is made with using of the theory's of electrical field methods and the theory's of electrical circuits methods, including method of power balance. In order to increasing of technical-economical parameters and reliability of plants with semiconductor frequency converters requirements to form of function of power in relationship to rotating speed of shaft generator, to distribution of power in case of parallel operation of shaft generator and auxiliary diesel-generator, to procedure of turning equipment on and off in case of reduction of main diesel's rotation speed, to joint operation of frequency converter and synchronous compensator and others are developed. Received mathematic expressions can be used for justification and choice of structure and parameters of equipment and developing of algorithms of automatic control and regulating systems.

Ключевые слова: валогенератор, валогенераторная установка, преобразователь частоты, потребитель электроэнергии, режим эксплуатации, активная мощность, реактивная мощность, электромагнитный момент, баланс мощностей.

Key words: shaft generator, shaft generator plant, frequency converter, electric consumer, operation mode, active power, reactive power, electromagnetic torque, power balance.

Н А современном морском транспортном флоте широкое распространение получили валогенераторные установки (ВГУ) с синхронным валогенератором (ВГ), полупроводниковыми преобразователями частоты (ППЧ) и синхронными компенсаторами (СК). Установки данного типа производят ведущие мировые электротехнические фирмы, в том числе *Siemens, Converteam, Rolls-Royce* и др. [1].

Применение ППЧ расширяет функциональные возможности ВГУ, позволяет ВГ работать как в генераторном, так и в двигательном режимах [2], [3].

Основными режимами эксплуатации ВГУ с ППЧ являются:

- автономный генераторный;
- генераторный параллельно с вспомогательными дизель-генераторами (ВДГ);
- автономный двигательный;
- двигательный совместно с главным двигателем (ГД).

Традиционная ВГУ данного типа состоит из синхронного ВГ, СК, ППЧ со звеном постоянного тока на базе ведомого инвертора (ВИ) и управляемого выпрямителя (УВ).

В ходовых режимах ВГУ работают автономно, полностью обеспечивая общесудовые потребители электроэнергией. При автономной работе ВГУ с ППЧ на базе ВИ синхронный ВГ вырабатывает активную мощность $P_{ВГ}$, которая через ППЧ поступает в судовую сеть, питая общесудовые потребители $P_{ЭП}$ и СК $P_{СК}$.

Реактивную мощность, необходимую для коммутации однооперационных тиристорных ведомого инвертора $Q_{ВИ}$ и питания общесудовых потребителей $Q_{ЭП}$, вырабатывает СК $Q_{СК}$. Баланс активных и реактивных мощностей определяется следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_{ВГУ} &= P_{ВГ} - P_{СК} \\ Q_{ВГУ} &= Q_{СК} - Q_{ВИ} \\ P_{ПП} &= \eta_{ПП} \cdot P_{ВГ} \end{aligned} \right\},$$

где $P_{ВГУ}$, $Q_{ВГУ}$ — активная и реактивная мощность ВГУ; $\eta_{ПП}$ — КПД полупроводникового преобразователя.

Энергетическая диаграмма активных и реактивных мощностей при автономной работе ВГУ представлена на рис. 1. Активная мощность, вырабатываемая ВГ, зависит от частоты вращения n и электромагнитного момента M . Пренебрегая потерями, можно определить мощность, отдаваемую ВГУ в судовую сеть как

$$P_{\text{ВГ}} = M_{\text{ВГ}} \cdot n_{\text{ВГ}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{ВГ}}$, $n_{\text{ВГ}}$ — электромагнитный момент и частота вращения ВГ.

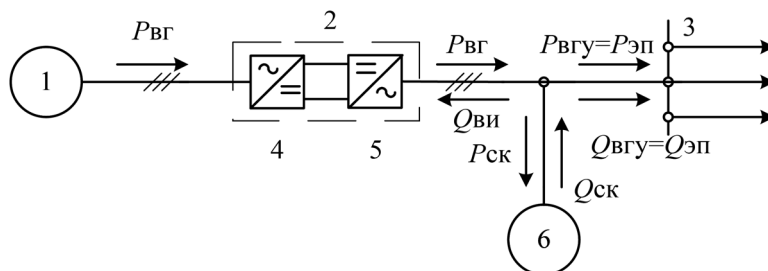


Рис. 1. Диаграмма баланса мощностей при автономной работе традиционной ВГУ с ПП
1 — синхронный ВГ; 2 — ПП; 3 — главный распределительный щит (ГРЩ);
4 — выпрямитель; 5 — ВИ; 6 — СК

Без учета явнополюсной составляющей электромагнитный момент равен

$$M_{\text{ВГ}} = \frac{mE_0 I_{\text{ВГ}} \cos \psi}{\omega};$$

$$\psi = \angle \bar{E}_0 \bar{U}_{\text{ВГ}},$$

где E_0 , $I_{\text{ВГ}}$, ω — ЭДС холостого хода, ток и угловая скорость ВГ соответственно; $U_{\text{ВГ}}$ — напряжение ВГ.

С учетом того, что $E_0 = k\omega\Phi$, где k — коэффициент, Φ — магнитный поток, получим

$$M_{\text{ВГ}} = mk\Phi I_{\text{ВГ}} \cos \psi. \quad (2)$$

Выражение (1) показывает, что снижение частоты вращения ВГ приведет к пропорциональному снижению генерируемой мощности. Для поддержания постоянства мощности необходимо увеличить электромагнитный момент ВГ, форсируя магнитный поток генератора обратно пропорционально снижению частоты (формула 2).

При снижении частоты вращения ВГ ниже значения, при котором обеспечивается поддержание постоянства мощности, происходит ограничение тока возбуждения и ВГ регулируется с постоянством $M = \text{const}$. Вырабатываемая мощность в данном случае будет изменяться пропорционально частоте вращения ГД.

На рис. 2 представлена зависимость мощности вырабатываемой ВГ в функции частоты вращения. В диапазоне от 70 до 100 % от номинальной частоты ВГ может работать с номинальной нагрузкой. С уменьшением частоты вращения мощность ВГ ограничивается, и при достижении 30 – 40 % от номинальной величины ВГУ выводится из работы. Ограниченное время возможна работа ВГ с мощностью, несколько превышающей допустимую для данной частоты.

При частоте вращения ВГ ниже 30 – 40 % происходит отключение ВГ. Для того чтобы при дистанционном управлении избежать обесточивания судна, остановка ГД после снижения частоты до минимальной величины осуществляется только после запуска и перевода нагрузки на ВДГ.

В ВГУ с синхронным валогенератором и преобразователем частоты на базе ВИ возможен режим параллельной работы ВГ и ВДГ. Особенность режима параллельной работы ВГУ данного типа состоит в том, что электроэнергию вырабатывают три электрических машины (ЭМ), между которыми распределяется активная и реактивная нагрузка.

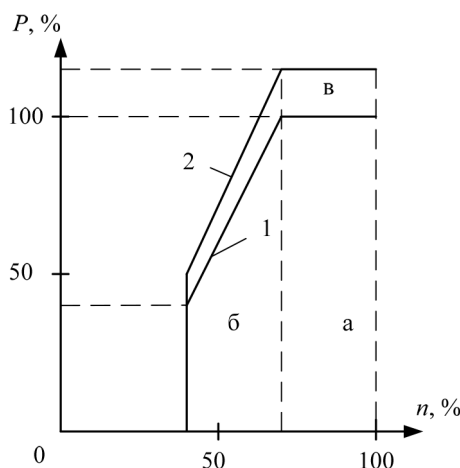


Рис. 2. Зависимость мощности ВГ от частоты вращения вала
1, 2 — продолжительный и кратковременный режимы работы соответственно;
а — без ограничения по мощности; б — с ограничением по мощности;
в — с допустимой кратковременной перегрузкой

При параллельной работе ВГУ и ВДГ активная мощность распределяется между ВГ и СГ, а реактивная — между СК и СГ. При этом справедливы следующие выражения:

$$P_{\text{ЭП}} = P_{\text{ВГУ}} + P_{\text{ДГ}};$$

$$P_{\text{ВГУ}} = P_{\text{ВГ}} - P_{\text{СК}};$$

$$Q_{\text{ЭП}} = Q_{\text{ВГУ}} + Q_{\text{ДГ}};$$

$$Q_{\text{ВГУ}} = Q_{\text{СК}} - Q_{\text{ВИ}},$$

где $P_{\text{ЭП}}$, $P_{\text{ВГ}}$, $P_{\text{ВГУ}}$, $P_{\text{СК}}$, $P_{\text{ДГ}}$, $Q_{\text{ЭП}}$, $Q_{\text{ВГ}}$, $Q_{\text{ВГУ}}$, $Q_{\text{ДГ}}$, $Q_{\text{СК}}$ — активные и реактивные мощности соответственно потребителей электроэнергии, ВГ, ВГУ, СК, ВДГ.

Диаграмма распределения мощностей при параллельной работе ВГУ и ВДГ представлена на рис. 3. С целью снижения расхода топлива и себестоимости вырабатываемой электроэнергии распределение активной нагрузки между ВГ и ВДГ производится непропорционально их мощностям. При экономичном режиме ВГ нагружается на номинальную мощность, остальную нагрузку принимает ВДГ. При этом нагрузка на ВДГ не должна быть ниже предельно допустимой для дизеля, что составляет около 30 % от номинальной мощности.

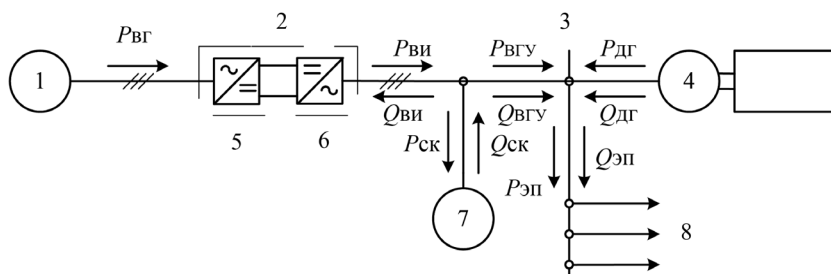


Рис. 3. Диаграмма распределения мощностей при параллельной работе ВГУ и ВДГ
1 — ВГ; 2 — ПП; 3 — ГРЩ; 4 — СГ; 5 — выпрямитель;
6 — ВИ; 7 — СК; 8 — потребители электроэнергии

Распределение активных мощностей между ВГУ и ВДГ происходит в соответствии со следующим законом:

$$\begin{cases} P_{\text{ДГ}} = P_{\text{ЭП}} - P_{\text{ВГ}} \\ P_{\text{ДГmin}} \leq P_{\text{ДГ}} \leq P_{\text{ДГном}} \\ P_{\text{ВГ}} \leq P_{\text{ВГmax}} \\ P_{\text{ВГmax}} = f(n_{\text{ВГ}}) \end{cases}, \quad (3)$$

где $P_{\text{ДГmin}}$, $P_{\text{ДГном}}$ — минимально допустимая и номинальная мощность ВДГ; $P_{\text{ВГmax}}$ — максимальная допустимая мощность ВГ для данной частоты вращения.

На рис. 5 приведены варианты экономичного распределения активной мощности при параллельной работе ВГ и ВДГ в соответствии с законом распределения (3). При уменьшении нагрузки ВДГ разгружается до минимально допустимого уровня, после чего снижается нагрузка ВГ (рис. 4, а). Вариант, когда у ВДГ минимально допустимая нагрузка, а ВГ работает с долевой нагрузкой, представлен на рис. 4, б. При уменьшении частоты вращения ГД происходит ограничение мощности, вырабатываемой ВГ (рис. 4, в), в результате чего происходит перевод нагрузки на ВДГ.

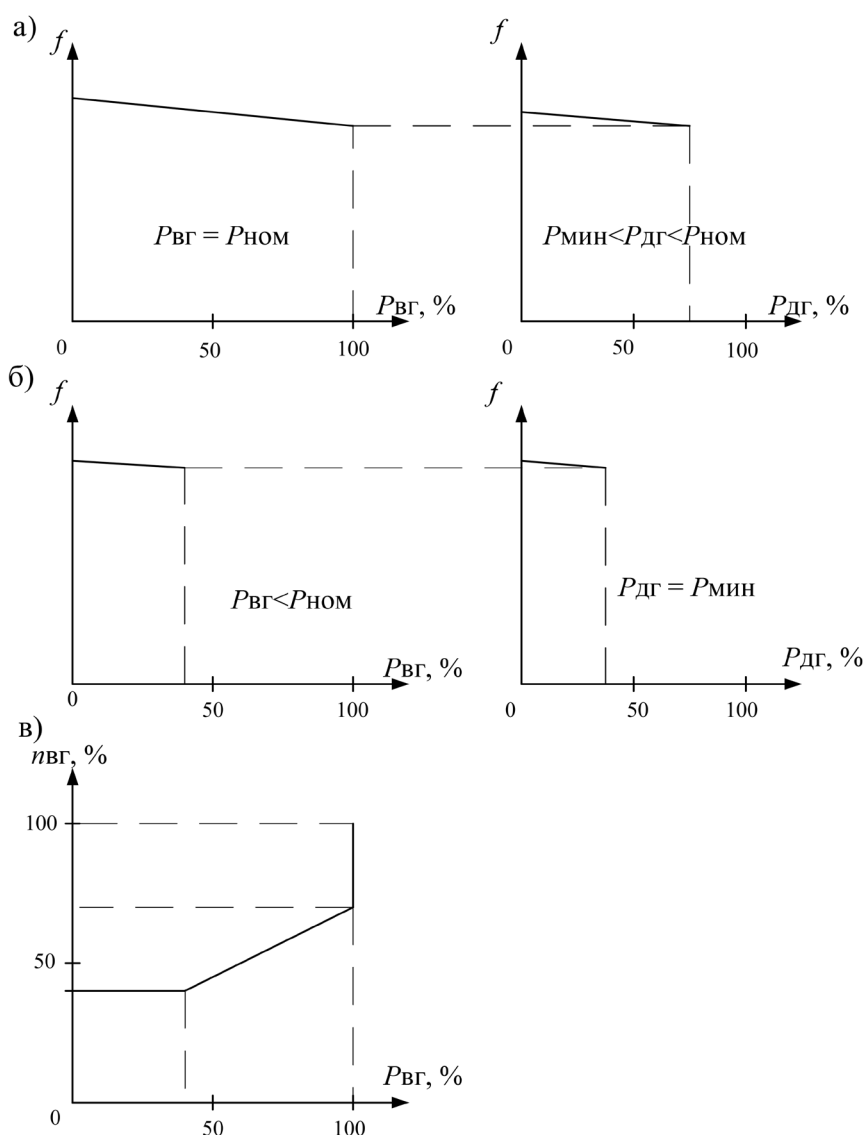


Рис. 4. Экономичное распределение активной мощности при параллельной работе ВГУ и ВДГ

а — номинальная нагрузка ВГ и долевая нагрузка ВДГ;

б — долевая нагрузка ВГ и минимальная нагрузка ВДГ;

в — ограничение мощности ВГ в функции частоты вращения

Одним из достоинств ВГУ на базе ППЧ является возможность реализации двигательного режима работы [4] – [10]. При этом ВГ может работать в качестве гребного электродвигателя (ГЭД) автономно или совместно с ГД. В первом случае ВГ может обеспечивать аварийный ход судна (так называемый режим «Power Take Home», или «РТН»). Совместная работа с ГД на винт используется для увеличения скорости судна и компенсации колебания момента нагрузки.

Двигательный режим работы ВГ может быть реализован при использовании обратимого ППЧ, к которому, в частности, относится двухзвенный ППЧ на базе УВ и ВИ, а также непосредственные ППЧ (циклоконверторы). Векторная диаграмма синхронного ВГ, работающего в двигательном режиме с перевозбуждением, представлена на рис. 5.

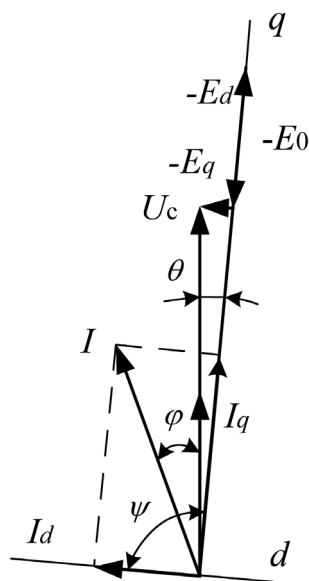


Рис. 5. Векторная диаграмма синхронного ВГ, работающего в двигательном режиме

При работе в двигательном режиме ВГ потребляет из сети активную мощность, вырабатываемую ВДГ. Реактивная мощность для коммутации тиристоров ППЧ поступает от ВГ и ВДГ.

Энергетическая диаграмма для двигательного режима работы синхронного ВГ с ВИ представлена на рис. 6. Активную мощность для питания ВГ $P_{ВГ}$ и потребителей электроэнергии $P_{ЭП}$ вырабатывает ВДГ $P_{ДГ}$. Для повышения $\cos\varphi$ в судовой сети в данном режиме может работать СК, вырабатывающий реактивную мощность $Q_{СК}$, что снижает токовую нагрузку на синхронный генератор ВДГ. При этом выполняются следующие равенства:

$$P_{ДГ} = P_{ВГУ} + P_{ЭП};$$

$$P_{ВГУ} = P_{ВГ} + P_{СК};$$

$$Q_{ЭП} = Q_{ВГУ} + Q_{СК};$$

$$Q_{ВГУ} = Q_{СК} - Q_{ПП};$$

где $P_{ЭП}$, $P_{ВГУ}$, $P_{ВГ}$, $P_{ДГ}$, $P_{СК}$, $Q_{ЭП}$, $Q_{ВГУ}$, $Q_{ВГ}$, $Q_{СК}$, $Q_{ПП}$ — соответственно активная и реактивная мощность потребителей электроэнергии, ВГУ, ВГ, ВДГ, СК, ППЧ.

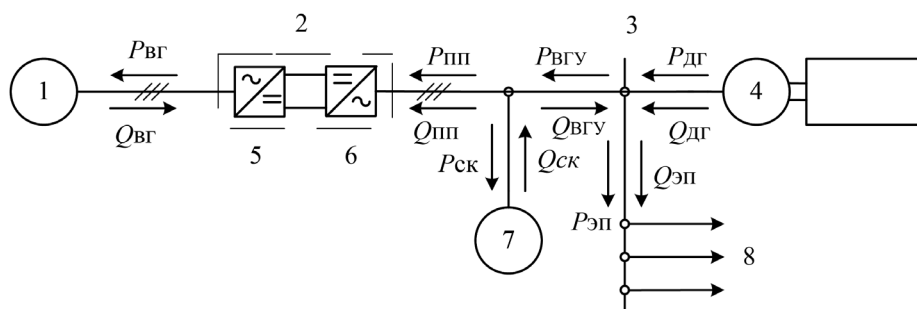


Рис. 6. Диаграмма распределения мощностей при работе синхронного ВГ с ПП на базе ВИ в двигательном режиме
1 – ВГ; 2 – ПП; 3 – ГРЩ; 4 – СГ; 5 – УВ; 6 – ВИ; 7 – СК; 8 – потребители электроэнергии

В современных ВГУ наибольшее применение нашли ППЧ со звеном постоянного тока [11], [12] на базе ВИ и значительно реже — с непосредственной связью. Данные ППЧ охватывают практически весь диапазон мощностей судовой силовой преобразовательной техники. Их силовые схемы, как правило, строятся на основе однооперационных тириستоров.

Среди недостатков ППЧ на базе однооперационных вентилях, используемых в составе современных ВГУ, следует отметить:

- применение сетевой коммутации;

- сложность технической реализации защиты от аварийных режимов;
- низкое качество электроэнергии в судовой сети;
- сложность осуществления коммутации тириستоров ВИ при пуске ВГ, работающего в двигательном режиме.

К недостаткам традиционных полупроводниковых клапанов относятся: неполная управляемость и низкая рабочая частота у однооперационных тиристоров, значительная мощность управления и сравнительно низкая надежность у биполярных транзисторов.

Выводы

1. Применение ППЧ позволяет расширить функциональные возможности ВГУ и реализовать следующие режимы эксплуатации:

- автономный генераторный;
- генераторный параллельно с вспомогательными дизель-генераторами (ВДГ);
- автономный двигательный;
- двигательный совместно с главным двигателем (ГД).

2. В целях повышения технико-экономических показателей и надежности ВГУ с ППЧ в различных режимах эксплуатации разработаны требования к зависимости мощности от частоты вращения ВГ, к распределению мощности при параллельной работе ВГ и ВДГ, к порядку ввода и вывода оборудования из работы при снижении частоты вращения ГД, к совместной работе ППЧ и СК и др.

3. Полученные математические зависимости могут быть использованы при проектировании с целью выбора структуры и параметров оборудования ВГУ и разработке алгоритмов систем автоматического управления и регулирования.

Список литературы

1. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография / А. В. Григорьев, В. А. Петухов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 176 с.
2. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев // Морской флот. — № 2. — 2013. — С. 50–52.
3. Григорьев А. В. Судовые валогенераторные установки нового поколения на базе обратимых полупроводниковых преобразователей / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Морской вестник. — 2013. — № 2 (11). — С. 36–38.
4. Григорьев А. В. Электроэнергетические установки танкеров-газовозов / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Судостроение. — 2010. — № 3. — С. 39–42.
5. Зайнуллин Р. Р. Стендовые испытания судовых систем электродвижения / Р. Р. Зайнуллин, А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. СУДОМЕТРИКА-2010: тезисы докладов Третьей Всероссийской научно-технической конференции. — СПб.: Судометрика. — 2010. — С. 42–44.
6. Григорьев А. В. Схемные решения перспективных низковольтных судовых систем электродвижения / А. В. Григорьев, В. В. Романовский, Р. Р. Зайнуллин // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4 (62). — С. 76–78.
7. Григорьев А. В. Схемотехнические решения перспективных электроэнергетических установок танкеров-газовозов / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов. Тезисы докладов. ГМА им. адм. С. О. Макарова. — СПб.: Северная звезда. — 2010. — С. 122–125.
8. Григорьев А. В. Низковольтные судовые системы электродвижения // Науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов. Тезисы докладов. ГМА им. адм. С. О. Макарова / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин. — СПб.: Северная Звезда. — 2011. — С. 179–180.

9. Григорьев А. В. Целесообразность применения СЭД на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, В. И. Штрамбранд, Р. Р. Зайнуллин // Морской флот. — 2014. — № 4. — С. 38–40.

10. Григорьев А. В. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 40–46.

11. Григорьев А. В. Опыт проектирования и результаты испытаний судового полупроводникового преобразователя частоты на новой элементной базе / А. В. Григорьев, Ю. А. Кулагин, Р. В. Митрофанов // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1 (63). — С. 53–58.

12. Григорьев А. В. Анализ отказов и аварийных режимов преобразователя частоты гидрографического судна «Вайгач» / А. В. Григорьев, Д. И. Улитовский // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 2 (64). — С. 41–46.

УДК 621.37К

Е. Г. Барщевский,
канд. техн. наук, проф.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА ПАРАМЕТРЫ МОДУЛИРОВАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

INFLUENCE OF DESIGN FEATURES GENSER ON PARAMETERS MODULATED VOLTAGE GENERATOR

В статье рассматривается влияние конструктивных особенностей генераторных агрегатов, в частности, несоосности и гибкости валов, эллипсности валов, дефектов подшипников, производственных и монтажно-производственных допусков в редукторах на низкочастотную модуляцию напряжения генераторных агрегатов. Показано, как определить наличие несоосности валов генераторных агрегатов, степень влияния несоосности валов на низкочастотную модуляцию и пути минимизации этого влияния. В статье показано, что для уменьшения влияния производственных и монтажно-производственных допусков, целесообразно выбирать двигатели с более высокой скоростью вращения и отдавать предпочтение одновальным агрегатам. В статье рассматриваются вопросы повышения качества напряжения судовых электроэнергетических систем. С целью уменьшения влияния неуравновешенных масс, несоосности валов, эллипсности шеек предлагается выбирать первичные двигатели с более высокой скоростью вращения.

The influence of design features of generating units, in particular, shaft misalignment and shaft flexibility, shaft ellipticity, defects of bearings, production tolerances and assembly and manufacturing tolerances in reducers on the low-frequency modulation of voltage of the generating units is considered in the article. It is shown how to identify the presence of shaft misalignment of generating units, the degree of influence of shaft misalignment on the low-frequency modulation and ways to minimize this impact. The paper shows that in order to reduce the impact of production tolerances and assembly and manufacturing tolerances it is advisable to choose engines with higher speed, preferring single-shaft units. In general the questions of quality improvement of tension of ship electrical power systems are considered in article. For the purpose of reduction of unbalanced masses influence, shaft misalignment, necks ellipticity it is offered to choose primary engines with higher speed of rotation.

Ключевые слова: амплитудно-частотная модуляция, несоосность валов, дефекты подшипников, низкочастотная модуляция, демпферная обмотка.

Key words: chastotnaya sampling analogue modulation, shaft misalignment, bearing defekty, low-frequency modulation damper.

В СВЯЗИ с широким использованием на судах средств вычислительной техники, автоматизированных систем управления, с развитием силовой полупроводниковой техники, микропроцессорных систем становится особенно актуальной проблема повышения качества электроэнергии на судах. Работа судовых электроэнергетических систем характеризуется большим количеством квазиустановившихся процессов, сопровождающихся искажением формы кривой и модуляцией напряжения. При этом существуют частотная (высокочастотная и низкочастотная) и амплитудная модуляции. Одной из распространенных причин низкочастотных модуляций напряжения является несоосность валов генераторных агрегатов [1]. При несоосности валов генератора и первичного двигателя в процессе работы агрегата при подходе осей к точке перегиба происходит замедление скорости вращения генератора, а после преодоления точки перегиба потенциальная энергия упругой системы переходит в кинетическую, и скорость вращения агрегата возрастает. Наличие знакопеременного ускорения за один оборот вала вызывает соответствующее увеличение и уменьшение ЭДС как по амплитуде, так и по частоте.

При поточной центровке, вызывающей угловое смещение соединенных валов, имеет место не только неравномерная скорость вращения, но и поперечные и продольные смещения ротора генератора. Частота этих перемещений равна частоте перемещения вала:

$$F_f = \frac{n_0}{60}. \quad (1)$$

Параметры амплитудно-частотной модуляции напряжения определяются параметрами излома и смещения сочлененных валов, скоростью вращения, частотой тока генераторов, величиной и характером нагрузки. При этом основной причиной модуляции напряжения является несоосность валов.

При постоянной нагрузке ($Z_{np} = \text{const}$) модулирующая частота напряжения по амплитуде и частоте определяется скоростью вращения генератора (1).

Особенно чувствительны к несоосности валов генераторные агрегаты с жесткими и полужесткими муфтами, поэтому к этим агрегатам должны предъявляться более жесткие требования по допускам на несоосность валов как в период монтажа, так и в период эксплуатации. Сочленение валов с помощью упругих муфт несколько ослабляют влияние несоосности на степень неравномерности вращения, а, следовательно, положительно влияет на параметры эксплуатационно-частотной модуляции напряжения, но полностью не устраняет вредное влияние несоосности валов на качество напряжения. В некоторых случаях соединительные муфты сами могут являться первопричиной неравномерности скорости вращения генераторов.

В настоящее время в литературе нет точных данных о возбуждающих колебание силах, вызванных несоосностью валов, поэтому не представляется возможным математически точно вывести уравнение движения агрегата с несоосными валами, хотя частота колебательного движения может быть определена достаточно точно (F_f). Сложнее обстоит вопрос с определением амплитуды колебания скорости.

Аналитическое выражение амплитудно-частотно-модулированного напряжения агрегата с несоосными валами аналогично выражению модулированного выражения агрегата с неуравновешенной массой. У агрегатов с равномерной скоростью вращения первичных двигателей (ТГ, ДГ) несоосность валов может быть обнаружена по характеру изменения огибающей амплитуд напряжения при $\Phi_m = \text{const}$. Для наших агрегатов огибающая амплитуд может служить критерием соосности валов [2].

Для определения степени несоосности валов приводного двигателя и генератора надо определить колебание амплитуды напряжения при независимости возбуждении и по предварительно составленной шкале напряжений оценить качество сборки агрегатов. Способ позволяет не только проверить качество сборки, но и довести ее до высокой степени точности и тем самым снизить влияние несоосности валов на модуляцию напряжения. Отрицательное влияние несоосности валов на качество напряжения устраняется тщательной центровкой.

Влияние эллипсности валов и дефектов подшипников на модуляцию напряжения агрегатов

Модуляции напряжения у генераторных агрегатов могут быть обусловлены эллипсностью шеек валов и дефектами деталей подшипников качения и скольжения. Модулирующая частота F_f при эллиптичности шеек валов в два раза и более превышает частоту вращения вала

$$F_{f1} = \frac{n_0}{60} \cdot \quad (2)$$

При дефектах деталей подшипников колебания скорости вращения будут иметь частоты более высокие, чем частота вращения вала F_f [4]. Так, частота ударных колебаний (модулирующая частота), обусловленных ненормальной работой подшипников качения, определяется из выражения

$$F_{f2} = \frac{D_k}{d_{ш}} \cdot F_f Z_{ш}, \quad (3)$$

где D_k — внутренний диаметр неподвижного кольца подшипника, см; $d_{ш}$ — диаметр шарика, см; F_f — число оборотов вала в секунду, Гц; $Z_{ш}$ — число шариков.

Если у генераторного агрегата имеет место эллипсоидность шеек валов (первичного двигателя, генератора, редуктора), низкочастотной модуляция напряжения будет при

$$2F_{f1} < f_{осн}, \quad (4)$$

где F_{f1} — модулирующая частота, обусловленная эллипсностью шеек вала; $F_{осн}$ — основная частота тока генератора.

При других соотношениях между частотами F_f и $f_{осн}$ будут иметь место только высокочастотные модуляции напряжения [5].

Низкочастотные модуляции напряжения у генераторных агрегатов при дефектах деталей подшипников также будут, если

$$F_{f2} < f_{осн}, \quad (5)$$

где F_{f2} — модулирующая частота, обусловленная дефектами подшипников.

Из (3) видно, что овальность шеек валов и дефекты подшипников могут вызывать как низкочастотные, так и высокочастотные модуляции напряжения.

При неуравновешенности центробежных сил, овальности шеек валов и дефектах деталей подшипников будут иметь место сложные негармонические колебания скорости вращения генератора [6]. Низшими частотами колебания скорости вращения будут частоты, обусловленные неуравновешенностью центробежных сил.

Влияние производственных и монтажно-эксплуатационных допусков в редукторах на модуляции напряжения агрегатов

В комплект генераторных агрегатов могут входить не только муфты, но и редукторы, которые также оказывают влияние на качество напряжения генераторных агрегатов [3].

Влияние передаточных чисел редукторов на параметры низкочастотной модуляции напряжения рассматривалось ранее. Поэтому рассмотрим только влияние производственных и монтажно-эксплуатационных допусков редукторов на качество напряжения агрегатов.

Редукторы представляют собой сложную колебательную систему [7], [8]. Модуляции напряжения агрегатов с редукторами могут быть обусловлены многими монтажно-производственными допусками элементов редуктора.

Причиной колебаний выходной скорости редуктора могут быть эксцентриситет зубчатых венцов шестерен относительно осей, отклонения в шаге, профиле и размерах зубьев. Произведенные расчеты по выявлению влияния эксцентриситета зубчатых венцов шестерен, изготовленных по второму классу точности, показали, что при равномерной скорости вращения выходного вала редуктора неравномерность скорости вращения вала генератора $\delta_3 = \frac{1}{80}$, $R_v = \pm 2,5\%$, что недопустимо.

При учете всех неизбежных производственных отклонений в зацеплениях шестерен неравномерность вращения окажется еще большей. Редукторы имеют несколько вращающихся валов с различными скоростями вращения. При неуравновешенных валах, эксцентриситетах и других производственных и монтажных допусках и неточностях в изготовлении выходная скорость агрегата будет представлять сумму гармонических составляющих с различными частотами, амплитудами и фазами. Неточности в изготовлении и сборке редуктора, неуравновешенность валов и т.д. могут явиться возбудителями вынужденных колебаний скорости вращения агрегата.

Влияние гибких валов и демпферных устройств агрегата на модуляции его напряжения

Изменение жесткости пружин демпферных устройств также оказывает влияние на параметры модулированного напряжения. Уменьшение жесткости пружин против расчетной приводит к уменьшению модуляций по амплитуде в режиме холостого хода и при малых нагрузках. При увеличении нагрузки пружины демпферного устройства оказываются полностью сжатыми, что приводит к увеличению модуляций напряжения.

Как повышение, так и уменьшение жесткости пружин, по сравнению с оптимальной, оказывает отрицательное влияние на параметры амплитудно-частотно-модулированного напряжения агрегата [9]. Замена штатного демпферного устройства на демпферное устройство с фиксированным положением корончатой шестерни и меньшими жесткостями пружин привела к изменению параметров амплитудно-частотной модуляции напряжения агрегата. Замена гибкого вала на жесткий также привела к изменению параметров амплитудно-частотной модуляции напряжения. Ввиду того, что жесткость пружин оказалось недостаточной при нагрузке генератора, наблюдались удары в демпферном устройстве, так как росту амплитуд колебания скорости препятствовали ограничители.

Элементы механической передачи мощности агрегатов оказывают влияние на параметры амплитудно-частотной модуляции напряжения, а в некоторых случаях они сами могут быть возбудителями колебаний скорости вращения агрегата. Экспериментальные исследования подтвердили, что весьма сложные или нелинейные колебания хорошо демпфируются только при малой жесткости демпфера. Чрезмерная жесткость ухудшает колебательный процесс.

Выводы

1. Для уменьшения влияния неуравновешенных масс, несоосности валов, эллипсности шеек и других производственных и монтажно-производственных допусков целесообразно выбирать первичные двигатели с более высокой скоростью вращения.

2. Следует также стремиться исключить промежуточные звенья-редукторы. Более предпочтительными с точки зрения качества напряжения являются одновальные агрегаты.

Список литературы

1. Барцевский Е. Г. Идентификация и оптимизация судовых автоматизированных систем методами планирования эксперимента: монография / Е. Г. Барцевский, Ю. Я. Зубарев. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. — 255 с.
2. Шейнихович В. В. Качество электрической энергии на судах / В. В. Шейнихович [и др.] — Л.: Судостроение, 1988. — 335 с.
3. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. — Киев: Техника, 1981. — 166 с.
4. Сапунов М. Вопросы качества электроэнергии / М. Сапунов // Новости электротехники. — 2001. — № 4 (10).

5. *Карташев И. И.* Требования к средствам измерения показателей качества электроэнергии / И. И. Карташев, И. С. Пономаренко, В. Н. Ярославский // Электричество. — 2000. — № 4.
6. *Куро Жак.* Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении / Жак Куро // Новости электротехники. — 2005. — № 1 – 2.
7. *Ланцов В.* Контактная разработка силовых устройств: один из путей генерирования новых идей / В. Ланцов // Силовая электроника. — 2008. — № 2.
8. *Сазонов И. В.* Влияние производственных допусков в редукторах на качество напряжения / И. В. Сазонов // Новости электротехники. — 2007. — № 6.
9. *Воронцова Н.* Проблема качества электроэнергии / Н. Воронцова // Силовая электроника. — 2008. — № 2.

УДК 629.12.066

В. М. Приходько,
канд. техн. наук, проф.;

И. В. Приходько,
асп.;

Д. И. Игнатов,
асп.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНО-СУДОРЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ENERGY SUPPLY SHIPBUILDING AND SHIP-REPAIRING ENTERPRISES

Установлено, что судостроительно-судоремонтные предприятия являются весьма энергоёмкими производствами в отрасли водного транспорта. Одним из основных условий повышения конкурентоспособности их продукции (постройки, достройки, ремонта судов) заключается в снижении энергозатрат при её производстве (судостроении) и судоремонте. Проведённый анализ задач по совершенствованию системы организации и управления энергетическим обеспечением судостроительно-судоремонтных предприятий в отрасли водного транспорта выявил их взаимосвязанность. Причём, неверное или необъективное решение одной из них должно отразиться на результатах решения других задач. В частности, систему управления энергетическим обеспечением можно принять за многоцелевую функцию. Достижение её оптимума связано с выявлением рациональных уровней, соответствующих решению каждой частной задачи. Однако практически невозможно, оптимизировав каждую частную производную, получить оптимум многоцелевой функции. Это, естественно, вводит определённые ограничения при решении каждой задачи. Показано, что энергоаудит является инструментом повышения энергоэффективности судостроительно-судоремонтных предприятий в отрасли водного транспорта.

It is established that the shipbuilding and ship-repairing enterprises are highly energy-intensive industries in the sector of water transport. One of the main conditions for improving the competitiveness of their products (construction, completion, repair of courts) is to reduce energy consumption during its production (shipbuilding and ship repair. The analysis of the tasks to improve the system of organization and management of the provision of energy shipbuilding and ship-repairing enterprises in the water transport industry revealed that they were related. Moreover, incorrect or biased decision one of them should be reflected in the results of other tasks. In particular, the management system of energy provision can be taken as a multipurpose function. Achieve its optimum due to finding rational levels, corresponding to the solution of each particular problem. However, it is practically impossible to optimize each partial derivative to obtain the optimum multi-purpose functions. This, of course, introduces some limitations when solving each task. It is shown that the energy audit is a tool for improving the efficiency of the shipbuilding and ship-repairing enterprises in the water transport industry.

Ключевые слова: энергетическое обеспечение, эффективность энергообеспечения, система учёта, нормирование, энергетический мониторинг, оптимизация структуры, алгоритм энергомониторинга, энергоаудит.

Key words: energy supply, energy efficiency, system accounting, valuation, energy monitoring, optimization of the structure, the algorithm energy monitoring, energy audit.

В ОТРАСЛИ водного транспорта на судостроительно-судоремонтных предприятиях, судах, гидротехнических сооружениях, в морских и речных портах требует решения проблемы энерго- и ресурсосбережения [1], [2]. Разработанный новый метод безразборной сушки отсыревших обмоток судового, портового электрооборудования по энергосберегающей технологии с помощью управляемых универсальных тиристорных преобразователей портативного типа обеспечивает до 50 % сокращение затрат электроэнергии, повышение культуры производства и упрощение восстановления сопротивления изоляции [3] – [5] в эксплуатационных условиях на морском и речном транспорте.

Для судостроения и судоремонта предложен инновационный способ сушки и восстановления изоляционных систем электрооборудования судов током, регулируемым энергосберегающим портативным универсальным тиристорным преобразователем с перестраиваемой структурой силового вентильного модуля [6], [7]. Создана технологическая система обработки изоляции электрооборудования судов, обеспечивающая эффективное выполнение всех технологических процессов в судоремонте [8], [9].

Разработаны энергосберегающие мобильные установки с тиристорным управлением для обеспечения энергосберегающей технологии комплексных испытаний, оптимизации технологического процесса обнаружения дефектной изоляции, интенсификации определения скрытых мест повреждения и повышения эффективности диагностирования изоляционных систем электрооборудования судов, портов, гидросооружений, судостроительно-судоремонтных предприятий в отрасли водного транспорта [10] – [12].

Разработана и обоснована методика прогнозирования электропотребления судоремонтного предприятия [13] – [15], определен экономический эффект от её внедрения на судостроительно-судоремонтных предприятиях [16].

Синтезированы структура и состав компенсатора реактивной мощности дискретного типа, рассчитана его эффективность для повышения коэффициента мощности в системе электроснабжения судостроительно-судоремонтного предприятия [17]. Произведен расчет силовой схемы компенсатора реактивной мощности дискретного типа. В отличие от традиционных компенсаторов предложенное устройство имеет простую силовую схему и, вместе с тем, позволяет производить автоматическое регулирование величины реактивной мощности в широких пределах, имеет высокое быстродействие, не содержит контактных коммутационных элементов. Ввиду особенностей алгоритма работы компенсатора реактивной мощности дискретного типа исключаются электромагнитные переходные процессы (всплески тока) при коммутации конденсаторных батарей. Компенсатор реактивной мощности дискретного типа может широко использоваться для регулирования реактивной мощности в узлах нагрузки на стороне напряжения 0,4 кВ в системах электроснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий. Устройство способно в автоматическом режиме поддерживать заданную величину коэффициента мощности, не допуская при этом перекомпенсации. Выбраны параметры компенсатора реактивной мощности дискретного типа с учетом характеристик электрической питающей сети судоремонтного предприятия. Подтверждено, что управление режимами электроснабжения судостроительно-судоремонтного предприятия необходимо осуществлять с целью поддержания характеристик и режимов работы отдельных элементов системы электроснабжения в пределах нормативных параметров во избежание нарушения их нормального функционирования, предупреждения и локализации аварий, повышения общего качества оперативно-диспетчерского управления энергосистемой. Установка

компенсатора реактивной мощности дискретного типа прямо влияет на надежность функционирования энергосистемы судостроительно-судоремонтного предприятия и поддержания заданных (договорных) величин потребления реактивной мощности.

В настоящее время отсутствуют реальные возможности управления режимами электроснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий на требуемом уровне. В системах электроснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий нет устройств компенсации реактивной мощности, работающих в автоматическом режиме и обладающих необходимыми параметрами по точности и быстродействию. В рыночных экономических условиях системы электроснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий не имеют собственных генерирующих мощностей, чем обусловлена необходимость приобретения 100 % потребляемой электрической энергии у поставщиков на оптовом или розничном рынках электроэнергии и мощности. Это обстоятельство делает судостроительно-судоремонтные предприятия в значительной степени зависимыми от условий, диктуемых энергоснабжающей организацией в части финансовых и технических вопросов их взаимодействия. Причем неправильное установление плановых объемов потребления (следствием чего является отклонение от них фактических величин потребления) влечет применение к судостроительно-судоремонтному предприятию (потребителю) крупных санкций. В отрасли водного транспорта для комплексного решения проблемы повышения качества управления режимами электроснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий требуются научные исследования, опытно-конструкторские разработки, внедрение и промышленные испытания энергосберегающих автоматизированных бесконтактных устройств компенсации реактивной мощности, обладающих высокой точностью, быстродействием, унификацией, компактностью и простотой технического обслуживания, ухода, монтажа. Для судостроения и судоремонта целесообразно дать оценку эффективности применения инновационных автоматизированных энергосберегающих компенсаторов реактивной мощности при управлении режимами работы цеховых подстанций судостроительно-судоремонтных.

Управление режимами электроснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий необходимо осуществлять с целью поддержания характеристик и режимов работы отдельных элементов системы электроснабжения в пределах нормативных параметров во избежание нарушения их нормального функционирования, предупреждения и локализации аварий, повышения общего качества оперативно-диспетчерского управления энергосистемой [18].

Исследования систем электроснабжения и организации работы энергослужб судостроительно-судоремонтных предприятий выявили следующие проблемы:

- отсутствие возможностей оперативного контроля параметров электропотребления и контроля с накоплением данных за определенный промежуток времени, что делает невозможным проверку объемов, предъявляемых энергоснабжающей организации;
- отсутствие возможности контроля и учета параметров электропотребления и параметров качества электроэнергии отдельных потребителей, в том числе объектов обеспечения постройки, ремонта и испытания судов;
- отсутствие реальных возможностей управления режимами электроснабжения на требуемом уровне.

Для комплексного решения проблемы повышения качества управления режимами электроснабжения судостроительно-судоремонтного предприятий требуется разработка современной системы учета и контроля параметров электропотребления. С целью повышения технико-экономических показателей работы энергохозяйств судостроительно-судоремонтных предприятий необходимо разработать автоматизированную систему контроля и учета электропотребления, обеспечивающую решение задач коммерческого и технического учета потребленной энергии и мощности, обработку и архивацию данных в форматах, пригодных для дальнейшего анализа, и выполненную на современном техническом уровне. Автоматизированная информационно-измерительная система контроля и учета электропотребления судостроительно-судоремонтного предприятия должна осуществлять функции технического и коммерческого учета электроэнергии и мощности, производить сбор, обработку и

накопление данных энергопотребления и мониторинг параметров качества электрической энергии. Автоматизированная информационно-измерительная система контроля и учета электропотребления должна обеспечивать автоматический сбор информации о функционировании системы, составляющей структуру электроснабжения объектов судостроительно-судоремонтного предприятия; обработку и распределение информации; формирование управляющих команд, воздействующих на потребителей 2 и 3 категорий надежности; осуществление функций документирования; выполнение основных функций в масштабе реального времени. В результате анализа схемы электроснабжения конкретного судостроительно-судоремонтного предприятия необходимо установить перечень точек коммерческого и технического учета электроэнергии и мощности. Для оптимизации автоматизированной информационно-измерительной системы контроля и учета электропотребления целесообразно определить ее структуру, произвести выбор оборудования и функциональных узлов.

Одной из проблем для специалистов судостроительно-судоремонтных предприятий является разработка алгоритма мониторинга, который заключается в последовательно-пооперационном отображении текущей информации, ее обработки и классификационном анализе. На рис. 1 представлен алгоритм, отражающий порядок организации и применения энергетического мониторинга.

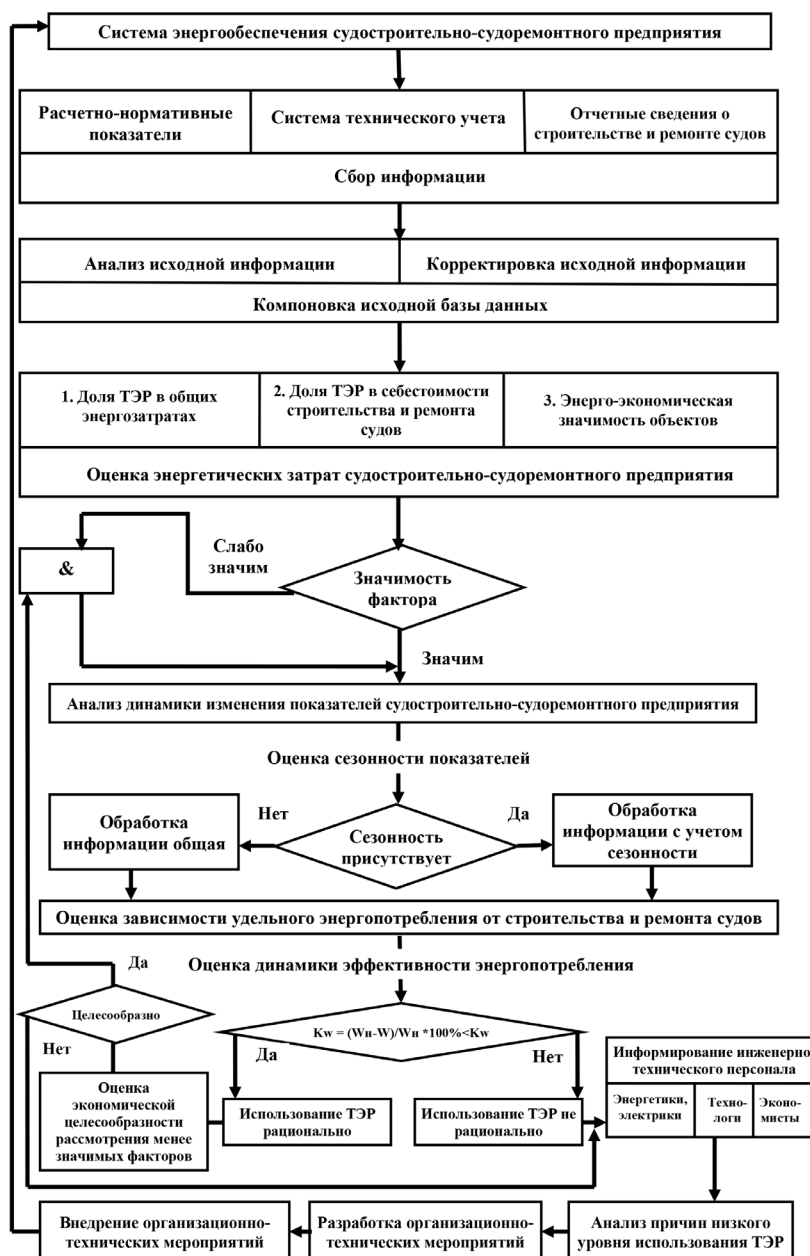


Рис. 1. Алгоритм энергетического мониторинга судостроительно-судоремонтного предприятия

В отрасли водного транспорта при судостроении и судоремонте ресурсоэнергосберегающее использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) является одной из главных актуальных задач для судостроительно-судоремонтных предприятий. При постройке, достройке, эксплуатации и ремонте судов речного, морского, рыбопромыслового флотов возможно уменьшение энергетических затрат на 30 – 35 % на судостроительно-судоремонтных предприятиях. В судостроении и судоремонте снижение энергозатрат при строительстве современных автоматизированных судов различного назначения и ремонте судов зарубежной постройки уменьшает их (судов) себестоимость. В рыночных экономических условиях это ресурсоэнергосбережение приводит к существенному повышению экономической эффективности работы судостроительно-судоремонтных предприятий, т.е. к увеличению их прибыли (кроме уменьшения себестоимости строительства и ремонта судов).

В отрасли морского и речного транспорта одним из основных способов решения этой задачи является проведение комплексных системных энергетических обследований (энергоаудита) судостроительно-судоремонтных предприятий. Опыт проведения системных энергетических исследований в форме энергоаудита обеспечивает следующие технико-экономические характеристики и показатели:

- определение нерациональных, неэнергосберегающих, неэкономичных режимов работы электрического, электронного, энергетического и технологического оборудования, систем управления на базе всесторонних обследований режимов функционирования, работы и энергопотребления объектов судостроительно-судоремонтных предприятий;
- прогнозирование электропотребления, детальный анализ эффективности энергопотребления на объектах судостроительно-судоремонтных предприятий и определение в перспективе реального потенциала ресурсо- и энергосбережения;
- определение и аналитическая оценка величины инвестиционных затрат на ресурсо- и энергосберегающие технические, экономические, социальные, организационные мероприятия с установлением приоритетов их разработок и внедрений;
- выявление, разработка концепции ресурсо- и энергосберегающей стратегии судостроительно-судоремонтных предприятий с учетом динамики их развития (или реструктуризации);
- формирование индивидуальных энергетических паспортов для судостроительно-судоремонтных предприятий в отраслях морского и речного транспорта.

В результате выполненных энергоаудита и проведенной паспортизации судостроительно-судоремонтных предприятий в отрасли водного транспорта установлены характерные аспекты проблемы, возникающие во время системных энергетических обследований (энергоаудитов) и требующих быстрого решения. Вопросы, которые необходимо решать в первую очередь, заключаются в следующем:

- обоснование и создание единого нормативно-правового обеспечения и документа для ресурсоэнергосберегающей стратегии, политики на уровне РФ и уровнях конкретных судостроительно-судоремонтных предприятий в отрасли водного транспорта;
- разработка общего методического обеспечения для проведения энергоаудита объектов водного транспорта, включая, суда, электротехнические комплексы «берег-судно», «док-судно», порты, гидротехнические сооружения, пристани, речные и морские вокзалы, судостроительные, судоремонтные предприятия, судоходные компании, ремонтно-эксплуатационные базы флота, береговые производственные участки, электроцеха, базы технического обслуживания флота, и создание на ПЭВМ автоматизированной системы электронного энергетического паспорта для обследуемых объектов;
- разработка технического, аппаратного, приборного обеспечения для выполнения энергоаудита объектов морского и речного транспорта, в том числе судостроительно-судоремонтных предприятий;
- организация, совершенствование системы подготовки, обучения, повышения квалификации специалистов по энергетическому менеджменту судостроительно-судоремонтных предприятий и энергоаудиторов;

– сбор информации для разработки и создания информационно-аналитического банка электронных данных на ПЭВМ по штатным типовым техническим решениям, обеспечивающим значительное повышение и эффективность применения ТЭР на судостроительно-судоремонтных предприятиях в отрасли водного транспорта.

Из результатов выполненного анализа и оценки энергетических обследований судостроительно-судоремонтных предприятий следует, что в судостроении и судоремонте на отдельных предприятиях не проводят эффективной методической, технической работы по ограничению, снижению энергоемкости строящихся, ремонтируемых судов, ссылаясь на объективные экономические обстоятельства и ввод экономических санкций со стороны западных стран.

Проведенные серии энергетических обследований в виде энергоаудита в отрасли морского и речного транспорта выявили главные факторы недостаточной эффективности применения ТЭР на судостроительно-судоремонтных предприятиях. К таким факторам относятся:

1. Отсутствие у инженерно-технических сотрудников, обслуживающего персонала, рабочих судостроительно-судоремонтных предприятий достаточных, эффективных, экономических, финансовых стимулов для ресурсоэнергосбережения, экономичного использования ТЭР.

2. Сезонность функционирования, т.е. летняя навигация речных судов на внутренних водных путях России, массовый зимний отстой судов речного флота и неритмичность работы судостроительно-судоремонтных предприятий по строительству судов «смешанного река-море плавания» и ремонту судов импортной постройки.

3. Морально, физически устаревшие виды электрического, электронного оборудования, систем управления, коммутационно-защитных аппаратов, основного и вспомогательного технологического оборудования, станков, инструментов.

4. Отсутствие систем диагностирования электрооборудования, электронной аппаратуры, коммутационно-защитных аппаратов, основного и вспомогательного мощного технологического оборудования.

5. В многочисленных разнообразных мощных электроприводах недостаточно или вообще не используются и пока не внедряются полупроводниковые энергосберегающие преобразователи частоты новейшей технологии на IGBT-биполярных транзисторах, которые обеспечивают более 60 % экономии электрической энергии, уменьшая потребление электроэнергии от сети за счет оптимального управления асинхронными электродвигателями с короткозамкнутыми роторами в зависимости от нагрузки, устраняя перегрузки сети, увеличивая срок службы электроприводов и оборудования.

6. Недостаточно определенный административно-экономический порядок, отсутствие системного подхода в электротехнических и энергетических комплексах судостроительно-судоремонтных предприятий.

7. Необеспеченность или отсутствие комплексной системы нормативного сопровождения по эффективному использованию ТЭР на судостроительно-судоремонтных предприятиях.

8. Малая обеспеченность судостроительно-судоремонтных предприятий современными энергосберегающими техническими средствами учета, контроля и, самое главное, отсутствие дифференцированного системного анализа эффективности энергетического потребления, а также недостаточное количество автоматизированных бесконтактных компенсаторов реактивной мощности для улучшения коэффициента мощности в системах электроснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий.

9. Недостаточное количество инженерно-технического персонала, сотрудников, служащих, рабочих высокой квалификации в энергетических службах судостроительно-судоремонтных предприятий и технологических энергоемких производств в отрасли водного транспорта.

10. Непонимание эффективности и экономической целесообразности ресурсоэнергосбережения, в частности, на рабочих производственных местах при строительстве современных автоматизированных судов и ремонте ранее построенных судов, в том числе на зарубежных судостроительных верфях.

11. Энергетические службы судостроительно-судоремонтных предприятий в отрасли водного транспорта традиционно не участвуют в формировании технической стратегии и портфеля актуальных заказов по строительству современных автоматизированных судов с энергосберегающим судовым электрооборудованием, полупроводниковыми преобразователями электроэнергии (управляемыми выпрямителями, инверторами, частотными преобразователями, преобразователями постоянного напряжения), быстродействующей электронной защитой судовых высоковольтных электроэнергетических систем и средствами ограничения аварийных коротких замыканий в судовых электротехнических комплексах, включая комплексы «берег–судно», «док–судно» [19].

На практике не осуществляется должный эффективный контроль соответствия выполнения производственных технологических операций мощностям энергопотребляющего оборудования, обеспечивающего эти технологические операции в судостроении и судоремонте.

В настоящее время имеются значительные потери ТЭР из-за аварийных простоев электрического, электронного, технологического и энергообеспечивающего оборудования, систем управления, коммутационно-защитной аппаратуры, которые возникают из-за неквалифицированного их технического использования, обслуживания или из-за несвоевременного, а иногда некачественного текущего ремонта [20].

В отрасли морского и речного транспорта при выполнении энергоаудита возникают определенные трудности и проблемы различного характера, которые необходимо учитывать.

Одна из проблем тесно связана с необходимостью преодоления психологических стереотипов как у технического персонала, эксплуатирующего энергетическое и технологическое оборудование, электрооборудование, так и у специалистов, проводящих энергоаудит. Для первых это характеризуется существующим у эксплуатационников мнением о том, что они хорошо знакомы со всеми своими проблемами, но, однако, из-за перечисленных факторов решить их в настоящее время не могут. Для вторых психологический стереотип характеризуется тем, что энергоаудиторы считают возможным решить все проблемы ресурсоэнергосбережения самостоятельно в достаточно сжатые определенные сроки.

Опыт и практика выполнения энергоаудита показали, что наиболее эффективные результаты энергетических обследований достигаются при решении этих задач в комплексе единой организацией-исполнителем (с привлечением компетентных технических специалистов и менеджеров) при обязательном активном участии заинтересованных технических и экономических специалистов самого судостроительно-судоремонтного предприятия.

Проблема состоит в необходимости решения специфических вопросов экспресс-оценки и контроля за техническим состоянием систем энергоснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий. Прежде всего, требуется количественная оценка аварийности любых электроэнергетических систем, в том числе систем распределения электрической энергии и систем электрообеспечения мощных электроустановок в каждом из цехов. В настоящее время при энергетических обследованиях этот вопрос практически не рассматривается в процессе энергоаудита. Подтверждено, что аварийность только в системах электроснабжения вызывает на судостроительно-судоремонтных предприятиях средний удельный ущерб не менее 1 доллара в год на 1 кВт заявленного максимума мощности. На практике различные нарушения нормального электроснабжения приводят к изменению технологических режимов и, как следствие, к потерям энергоносителей. В рыночной экономике объективно оцененные причины возникновения отказов, повреждений, аварий позволяют в значительной мере уменьшить аварийность в электроэнергетических системах, распределительных электрических сетях судостроительно-судоремонтных предприятий.

Другим аспектом этой проблемы является оценка целесообразности и возможности использования электроприемников различных цехов в качестве регуляторов-потребителей как полной, активной, реактивной мощности, так и электропотребления. На сегодня составленные и утвержденные на судостроительно-судоремонтных предприятиях перечни очередности, порядок отключения электроприемников (электропотребителей) часто имеют субъективный характер и не учитывают реальные потери энергоносителей при изменении режимов работы конкретных тех-

нологических и электрических агрегатов. Однако известно, что для отдельных технологических установок ограничение их электропотребления на определенную величину и заданную длительность приводит к перерасходу электроэнергии, эквивалентному величине этих ограничений.

Следует отметить аспект, который связан с оценкой уровня надежности внешнего и внутреннего электроснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий и оценкой соответствия обеспечения категорий электроприемников (электропотребителей) их схемной надежностью. Этот вопрос также практически не затрагивается в процессе энергоаудита, хотя его решение значительно способствует снижению отказов, повреждаемости, аварийности и необоснованных потерь энергоносителей. Для решения перечисленных вопросов требуются определенные технико-экономические компетенции, навыки и практические умения, а также обширные теоретические знания соответствующих отраслевых методик по оценке средних удельных ущербов и анализу эксплуатационной надежности.

В отрасли водного транспорта результаты практических энергетических обследований показывают, что процесс проведения энергоаудита достаточно неплохо формализуется и может быть отражен единым алгоритмом в виде перечисления решаемых технико-экономических задач применительно к объектам систем энергообеспечения и электропотребления судостроительно-судоремонтными предприятиями.

В настоящее время целесообразно использование мобильных электростанций для электроснабжения объектов морской и речной инфраструктуры. Мобильные электростанции применяются в качестве резервного (аварийного) электроснабжения потребителей, требующих повышенной надёжности и не допускающих перерывов подачи энергии при авариях в зонах централизованного электроснабжения. Мобильные электростанции для электроснабжения строящихся и ремонтируемых судов, портов, гидросооружений, судостроительно-судоремонтных предприятий представлены на рис. 2.



Рис. 2. Мобильные электростанции для электроснабжения объектов морской инфраструктуры

Современные системы бесперебойного и гарантированного питания (рис. 3) для повышения эффективности энергообеспечения объектов морской и речной инфраструктуры внедрены на крупнейших предприятиях нефтегазовой, промышленной, судостроительной отраслей: ОАО «Балтийский завод», ОАО «Северо-Западное пароходство», ОАО «Мурманское морское

пароходство», ОАО «СК «Волжское пароходство», ОАО «Совкомфлот», ФГУП «Росморпорт», ФГУП «Кронштадтский морской завод», ОАО «Лукойл-Арктик-Танкер», ООО «Лукойл-Калининград-морнефть», ОАО «Варандейский терминал», ЗАО «Севмор-нефтегаз», ОАО «ЦМКБ «Алмаз», ОАО «Невское ПКБ», ОАО «Северное ПКБ», ОАО КБ «Вымпел», ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», ОАО «СПМ – БМ «Малахит», ОАО ПО «Севмаш», ОАО «Северная верфь», ОАО «ЦС «Звёздочка», ОАО «Адмиралтейские верфи», ОАО «Судостроительная фирма «Алмаз», ОАО «Дальневосточный завод «Звезда», ОАО «Выборгский судостроительный завод», ОАО «Прибалтийский судостроительный завод «Янтарь», ОАО «ГМК Норильский никель» и др.



Рис. 3. Резервное электроснабжение объекта на базе дизель-генераторных установок в модульном контейнерном исполнении

Согласно нормам проектирования энергетических объектов комплектация оборудования должна создавать оптимальные условия для выполнения профилактических и ремонтных работ, а также обеспечивать безопасное и удобное техническое обслуживание электростанции. Суммарная мощность агрегатов должна покрывать максимальную нагрузку, учитывая при этом запуск двигателей и собственные нужды установки в электроэнергию. На основных электростанциях предусматривается минимум одна аварийная установка, мощность которой соответствует основной.

Таким образом, в рыночных экономических условиях требуется совершенствование системы организации и управления энергетическим обеспечением судостроительно-судоремонтных предприятий. Выполнен анализ задач, установлена их взаимная связь и определено влияние на совершенствование системы организации и управления энергетическим обеспечением судостроительно-судоремонтных предприятий. В отрасли водного транспорта подтверждено, что в реальном масштабе времени нет возможности управлять режимами каждого потребителя топливно-энергетических ресурсов. Экономически нецелесообразно организовывать технический учет в каждом пункте потребления энергоресурсов в связи с большими затратами средств. Судостроительно-судоремонтные предприятия должны иметь оптимальный уровень обеспечения техническим учетом, который позволит осуществлять упреждающее воздействие на их энергорежимы.

Для использования энергетической информации судостроительно-судоремонтные предприятия должны иметь специалистов-аналитиков (по управлению эффективностью энергообеспечения) и современные системы нормирования расхода энергоносителей. Установлено, что отсутствие развитой современной системы учета не позволяет контролировать энергетические режимы, управлять ими и вовремя воздействовать на них. Учет и нормирование являются составными частями системного и объективного энергетического мониторинга на судостроительно-судоремонтных предприятиях.

В отрасли водного транспорта необходима оптимизация структуры технического учета используемых энергоносителей. Для формализации энергетического мониторинга необходимо решить организационные, технические вопросы и разработать практические рекомендации. С целью последовательно-пооперационного отображения текущей информации, ее обработки и классификационного анализа предложен алгоритм энергетического мониторинга судостроительно-судоремонтных предприятий. Рассмотрены факторы, влияющие на возможности организации аналитического раздела энергетического мониторинга, в частности — оснащенность современными техническими средствами и программным обеспечением. Экономия энергоресурсов, снижение энергозатрат, повышение экономической эффективности работы судостроительно-судоремонтных предприятий, увеличение их прибыли можно обеспечить за счет выполнения комплексных энергетических обследований (энергоаудита).

Выявлены специальные вопросы, возникающие в процессе энергетических обследований и требующие своевременного решения как при проведении энергоаудита, так и при паспортизации судостроительно-судоремонтных предприятий. В результате энергоаудита определены главные факторы, приводящие к недостаточной эффективности применения топливно-энергетических ресурсов на судостроительно-судоремонтных предприятиях. Рекомендовано давать оценку аварийности энергетических систем, в том числе электроэнергетических. Подтверждено, что нарушения, аварии электроснабжения приводят к изменению технологических режимов и, как правило, к потерям энергоносителей. Установленные причины возникновения аварий позволяют существенно уменьшить аварийность в энергетических и электроэнергетических системах судостроительно-судоремонтных предприятий.

При проведении энергоаудита рекомендовано использование методик по определению ущерба и расчету надежности внешнего, внутреннего электроснабжения судостроительно-судоремонтных предприятий с оценкой соответствия обеспечения категорий электроприемников их схемной надежностью, что существенно способствует уменьшению аварий и снижению необоснованных потерь энергоносителей. Приведены современные системы бесперебойного и гарантированного электропитания для повышения эффективности энергообеспечения объектов морской и речной инфраструктуры. На основе проведенных исследований разработан комплекс мероприятий, совокупность которых направлена на совершенствование процесса управления электроснабжением судостроительно-судоремонтных предприятий.

Задержки в реализации ресурсоэнергосберегающих мероприятий наносят значительный экономический ущерб судостроительно-судоремонтным предприятиям и негативно отражаются на общей экологической и социально-экономической ситуации. Кроме того, дальнейший рост издержек морского и речного флотов сопровождается растущим дефицитом финансовых ресурсов, что задерживает обновление производственной базы судостроительно-судоремонтных предприятий в соответствии с достижениями научно-технического прогресса. Уменьшение энергетической составляющей в издержках строительства и ремонта судов позволит получить дополнительные средства для обеспечения приемлемого уровня морального и физического износа энергетического, электрического, электронного и технологического оборудования в отрасли водного транспорта.

Список литературы

1. Приходько В. М. Методы и технические средства комплексных испытаний элементов судовых электроэнергетических систем в судостроении и судоремонте: науч. моногр. / В. М. Приходько. — СПб.: ИПЦ СПГУВК, 2005. — 348 с.
2. Приходько В. М. Интенсификация комплексных испытаний судового электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: науч. моногр. / В. М. Приходько. — СПб.: СПГУВК, 2013. — 244 с.
3. Приходько В. М. Математическая модель при сушке судовых асинхронных двигателей по энергосберегающей технологии / В. М. Приходько, И. В. Приходько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 54–61.
4. Приходько В. М. Энергосбережение при восстановлении изоляции электрооборудования водного транспорта / В. М. Приходько, Ахмед Абдалла Исхаг Адам, П. А. Смирнов // Материалы международной научно-практической конференции «Водный транспорт России: инновационный путь развития». 6 – 7 октября 2010 года. — СПб.: СПГУВК. — 2011. — Т. 2. — С. 248–253.
5. Приходько В. М. Энергосбережение при восстановлении изоляционных систем / В. М. Приходько // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвузовский сб. науч. трудов. — СПб.: ГОУВПО СПбГТУРП. — 2009. — С. 174–180.
6. Приходько В. М. Экспериментальные характеристики сушки электрооборудования / В. М. Приходько // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвузовский сб. науч. трудов. — СПб.: ГОУВПО СПбГТУРП. — 2009. — С. 181–186.
7. Приходько В. М. Энергосберегающий способ восстановления изоляционных систем / В. М. Приходько, И. В. Приходько // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвузовский сб. науч. трудов. — СПб.: ГОУВПО СПбГТУРП. — 2007. — С. 202–207.
8. Приходько В. М. Система обработки изоляции электрооборудования / В. М. Приходько, Хассан Мелкави // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвузовский сб. науч. трудов. — СПб.: ГОУВПО СПбГТУРП. — 2009. — С. 181–186.
9. Приходько В. М. Система обработки изоляции электрооборудования судов, портов и гидротехнических сооружений / В. М. Приходько, Хассан Мелкави // Материалы международной науч.-практ. конференции, посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление». 1–2 октября 2009 г. — СПб.: ФГОУВПО СПГУВК. — 2009. — С. 194–199.
10. Приходько В. М. Энергоресурсосберегающий мобильный комплекс для диагностики изоляции электрооборудования судов, портов и гидросооружений / В. М. Приходько, Хассан Мелкави, М. В. Спиридонов // Материалы международной науч.-практ. конференции «Водный транспорт России: инновационный путь развития». 6 – 7 октября 2010 г. — СПб.: СПГУВК. — 2011. — Т. 2. — С. 254–260.
11. Приходько В. М. Мобильный комплекс для диагностики изоляционных систем / В. М. Приходько, Хассан Мелкави, М. В. Спиридонов // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвузовский сб. науч. тр. — СПб.: ГОУВПО СПбГТУРП. — 2010. — С. 62–66.
12. Приходько В. М. Энергоресурсосберегающая технология диагностики мощных трансформаторов / В. М. Приходько // Высокие технологии, исследования, промышленность: сб. тр. Девятой международной науч.-практ. конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 22–23.04.2010, Санкт-Петербург, Россия. — СПб.: РАН. — 2010. — Т. 3. — С. 345–359.
13. Приходько В. М. Эффективность методики прогнозирования электропотребления судоремонтным предприятием / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Морской вестник. — 2013. — № 3 (47). — С. 51–56.
14. Приходько В. М. Методика прогнозирования электропотребления судоремонтного предприятия / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 67–73.
15. Приходько В. М. Прогнозирование электропотребления судоремонтным предприятием / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Журнал университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК. — 2012. — № 2. — С. 103–108.

16. *Приходько В. М.* Экономический эффект внедрения методики прогнозирования электропотребления судоремонтного предприятия / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 191–194.

17. *Приходько В. М.* Эффективность компенсатора реактивной мощности дискретного типа / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 68–75.

18. *Приходько В. М.* Эффективность работ по техническому обслуживанию систем электроснабжения портов, гидросооружений и электротехнических комплексов «берег-судно» // В. М. Приходько, М. В. Спиридонов, П. А. Смирнов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 4. — С. 20а–25.

19. *Приходько В. М.* Ограничение аварийных токов в судовых электроэнергетических комплексах: науч. монография / В. М. Приходько. — СПб.: СПГУВК. — 2010. — 425 с.

20. *Игнатов Д. И.* Эффективность энергообеспечения судостроительно-судоремонтных предприятий / Д. И. Игнатов, И. В. Приходько, В. М. Приходько // Материалы VI межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 14 мая 2015 года. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. — С. 206–214.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 629.12: 519.24

В. Н. Кузнецов,
асп.;

А. А. Матвеев,
асп.;

А. П. Ныркоу,
д-р техн. наук, проф.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ВЕКТОРА ПРИЗНАКОВ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ СУДОВ

THE SIGNS DETECTION ALGORITHM IN SHIP RECOGNITION SOLUTION

Статья посвящена распознаванию судов на основе радиолокационного сигнала. Решение задачи предусматривает построение вектора признаков распознаваемого объекта и принятие решения о принадлежности объекта к некоторому классу. Выделение признаков предлагается выполнять с использованием частотного анализа при помощи преобразования Фурье, чтобы достичь некоторой инвариантности относительно поворота судна. При этом приводится алгоритм вычисления гармоник Фурье на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ), что позволяет уменьшить вычислительную сложность метода и использовать алгоритм в рамках задачи распознавания образов. Принятие решения о принадлежности объекта определенному классу предлагается на основе Байесовского подхода, что позволяет добиться простоты накопления базы знаний и высокой точности обработки данных. В совокупности методы нацелены на решение задачи классификации судов на основе радиолокационного сигнала и уменьшение ошибок распознавания.

This article deals with the recognition of the ships on the basis of the radar signal. Solution of the problem involves the construction of feature vectors recognizable object and a decision on an object belonging to a certain class. Feature extraction is proposed to perform using a frequency analysis by Fourier transform to achieve some invariant under rotation of the ship. At the same time provides an algorithm for computing the Fourier harmonics based on the FFT, which reduces the computational complexity of the method and algorithm used within the pattern recognition problem. Deciding on an object belonging to the class is offered on the basis of Bayesian approach. Deciding on an object belonging to the class is offered on the basis of Bayesian approach, which allows for ease of the knowledge base and high precision processing. The goal of both this methods is resolving ship classification task based on radio signal and decreasing recognition mistakes.

Ключевые слова: алгоритмы, распознавание судов, Байесовский подход, автоматизация, задача классификации.

Key words: algorithms, recognition of the ships, Bayesian approach, automation, classification task.



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ контроль и управление в наше время является неотъемлемой частью как производственных процессов, так и любого вида деятельности. Одна из областей, где особое значение имеет автоматизация производственного процесса, это водный транспорт [1] – [4]. Применение современных информационных технологий на водном транспорте позволяет наиболее точно определять расположение судов [5], [6], обеспечивает достаточный уровень их безопасности [7] – [9].

Для того чтобы своевременно принимать решения адекватные текущей обстановке, необходимо осуществлять мониторинг текущего состояния объекта. Для этих целей в порту предназначена система мониторинга акватории порта, которая должна предоставлять максимум инфор-

мации о судах, находящихся в порту, и их передвижениях [9], [10]. Для обеспечения этой задачи нужно уметь распознавать суда на основе радиолокационного сигнала системы и предоставлять полную информацию об обстановке в порту. Однако для построения эффективного распознавателя необходимо выбрать подходящий метод выделения характеристик объекта [11]. При этом набор характеристик должен хорошо определяться даже при изменении положения или поворота судна.

Основная задача исследования – получить методы распознавания судов для системы мониторинга акватории порта. Причем для этого предполагается использовать радиолокационные данные. Поскольку суда могут передвигаться по акватории порта по различным траекториям, нужно учитывать, что распознавание должно проводиться с учетом возможного поворота объекта.

Для мониторинга акватории порта возможно использование радиолокационных комплексов, расположенных вдоль берега порта, поэтому система распознавания судов должна учитывать особенности данных, на основании которых происходит распознавание, а также специфику условий эксплуатации системы. При этом необходимо, чтобы система могла распознать повернутые или зашумленные объекты.

Распознавание объектов может быть разделено на две задачи. Это задача классификации и задача кластеризации. В первом случае в распоряжении системы имеется конечный набор классов, и необходимо соотнести любой объект, подаваемый на вход, к одному из этих классов. Во втором случае возможно динамическое создание новых классов, если объект не подходит ни к одному из существующих. При распознавании судов, прибывающих в порт, будем считать, что их количество типов ограничено и известно заранее. Поэтому в рамках задачи распознавания судов более актуальна проблема классификации объектов.

Любое распознавание предполагает анализ некоторых признаков объекта, т.е. каждый объект распознаватель видит как совокупность некоторых признаков:

$$X = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad (1)$$

где X – некоторый объект, $a_1, \dots, a_n$: совокупность признаков объекта X .

Эффективность и качество построенного распознавателя зависит от выбора анализируемых характеристик и точности их определения в процессе работы [12], [13].

В работе распознавателя выделяется два режима. Первый – это режим обучения. В этом режиме распознавателю предлагается для изучения контрольная выборка объектов для каждого класса. Задачей системы классификации в данном режиме будет являться выделение характеристик для каждого объекта и накопление статистических данных для каждого класса. Накопленные статистические данные называются базой знаний распознавателя. Второй режим – это непосредственно распознавание. В этом режиме классификатор, основываясь на статистических данных базы знаний должен сделать вывод о принадлежности распознаваемого объекта к одному из заранее определенных классов. В отличие от кластеризации, в данном случае распознаватель не может определять новые классы или отвергать объект. Любому распознаваемому объекту должен быть поставлен в соответствие класс, пусть даже ошибочно определенный.

В этой ситуации полезно определять не только принадлежность классу, но и степень достоверности распознавателя в своем выборе. Эта достоверность может определяться степенью соответствия характеристик объекта статистическим данным, предлагаемым распознавателем [14].

В процессе работы системы в режиме распознавания база знаний может как оставаться неизменной с этапа обучения, так и пополняться новыми данными. Наиболее перспективным, на наш взгляд, является гибридный подход. В этом случае необходимо обновлять базу знаний автоматически лишь в том случае, если достоверность системы достигла некоторого порогового значения. Также должна быть возможность внесения изменений вручную, т.е. объекты, в которых система не уверена, должны быть подтверждены экспертом. В конечном итоге с ростом статистических данных должна увеличиваться точность распознавания.

Итак, для построения распознавателя необходимо определить набор характеристик, по которым будет проводиться анализ объектов. Набор характеристик должен достаточно точно опре-

деляться по входным данным. При построении системы мониторинга акватории порта используются радиолокационные комплексы, поэтому в качестве входных данных будет радиолокационная картина объекта. Перед распознаванием данные проходят предварительную обработку для более точного определения характеристик. На первом этапе идет фильтрация данных на уровне радиолокационного комплекса, затем в полученном изображении выделяем набор образов на основании алгоритма, основанного на обходе графа [15].

Входными данными для распознавателя будет изображение судна, выделенное из сигнала, полученного при помощи радиолокационного комплекса.

Суда входят в порт примерно по одной траектории и на изображениях будут повернуты примерно одинаково, однако, все равно не стоит забывать, что изображение судна, с которым работает распознаватель, является двумерной проекцией трехмерного объекта и в зависимости от угла обзора изображение одного и того же объекта может быть разным. Чтобы свести к минимуму влияние угла поворота объекта на процесс распознавания, можно производить анализ распознаваемого объекта в частотной области. Выделив определенные гармоники изображения, можно добиться некоторой инвариантности к углу обзора.

Однако прежде чем начать анализ объекта необходимо провести фильтрацию сигнала, а также выделить во входном сигнале области, содержащие объекты. Фильтрация радиолокационного сигнала происходит преимущественно техническими средствами. Современные радиолокационные станции уже включают в себя необходимый набор средств по фильтрации данных. В рамках задачи классификации судов, встроенных средств фильтрации данных достаточно. Чтобы улучшить эффективность работы алгоритмов распознавания объектов, необходимо сконцентрировать внимание алгоритма на конкретной области, которая содержит необходимый объект. Для этого, прежде чем начать обработку сигнала, выделим область с необходимым объектом, а все остальное отбросим. Для выделения объектов можно применять разные подходы. Например, контурный анализ или анализ градиента изображения и выделение области.

Одним из алгоритмов выделения области объекта, который можно использовать в рассматриваемой задаче, является алгоритм выделения объекта на основе алгоритма обхода графа [15]. После предварительной подготовки данных необходимо определить, что же все-таки «увидел» комплекс. В случае если в матрицу откликов радиолокационной станции (РЛС) попала информация о более чем одном объекте, непосредственное распознавание становится затруднительной задачей. Отдельным объектом будем считать связную область. Таким образом, необходимо предварительно всю картину разделить на отдельные значимые элементы. Следует заметить, что разрешающая способность РЛС по угловым координатам определяется шириной характеристики направленности антенны. Для повышения разрешающей способности необходимо или уменьшить длину волны, или же увеличивать размеры антенной системы. Уменьшать длину волны можно лишь до некоторых пределов, примерно до 2–3 см, так как при дальнейшем уменьшении длины волны возрастают потери энергии при распространении электромагнитных волн в атмосфере. Увеличение размеров антенны также связано с рядом ограничений. Во-первых, антенны не должны превышать по своим габаритам свободного пространства внутри транспортного средства, например, фюзеляжа самолета. Во-вторых, антенны не должны влиять на аэродинамические качества летательного аппарата. В-третьих, управление антенной при круговом обзоре должно быть достаточно простым. Ввиду этого разрешающая способность по углу места в реальных условиях сильно ограничена. На практике разница между значениями координат не менее 5 м на местности. Также и координаты по дальности зависят от длины волны излучателя. При этом при длине волны, обеспечивающей оптимальную дальность сканирования местности, разрешающая способность по дальности остается невысокой. Учитывая ограничения по минимальному расстоянию между судами, можно утверждать, что граф на основе матрицы откликов РЛС не будет иметь точек сочленения, а также то, что все точки, возможно принадлежащие рассматриваемой области, следует относить к исследуемому объекту, и они не могут означать части других судов. Для задачи выделения связных областей целесообразно использовать алгоритм, основанный на принципе обхода графа в ширину [15].

Основная идея алгоритма заключается в том, чтобы представить каждый элемент матрицы, отличный от нуля, как вершину графа. Таким образом, из исходной матрицы откликов получаем набор независимых друг от друга графов, каждый из которых интерпретируется как отдельная связная область, которая подлежит распознаванию. Теперь для получения каждой области необходимо методом перебора по исходной матрице найти непросмотренные вершины, отличные от нуля. В результате работы алгоритма получаем набор подмножеств вершин, образующих замкнутые области.

В дальнейшем для распознавания будем использовать выделенную связную область исходного сигнала, а не весь сигнал целиком.

Итак, анализировать входное изображение будем в спектральной области. Для этого предварительно выполним двумерное дискретное преобразование Фурье [16], [17]:

$$X_{pk} = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} x_{mn} e^{-2\pi i \left(\frac{pm}{M} + \frac{kn}{N} \right)}. \quad (2)$$

В области цифровой обработки сигналов существует алгоритм быстрого преобразования Фурье, который позволяет проводить преобразование с высокой производительностью [17]. Однако алгоритм разработан для одномерного преобразования. Для его использования в двумерном преобразовании перепишем формулу следующим образом:

$$X_{pk} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} x_{mn} e^{-2\pi i \left(\frac{pm}{M} \right)} \right) e^{-2\pi i \left(\frac{kn}{N} \right)}. \quad (3)$$

В скобках получилось обычное одномерное преобразование Фурье. Таким образом, двумерное преобразование Фурье выглядит как поочередное одномерное преобразование по строкам, затем по столбцам.

В качестве признаков для распознавания можно использовать гармоники преобразования Фурье. Причем можно использовать не все гармоники, а лишь часть в верхних правом и левом квадрантах. Выделенные гармоники для каждого изображения будем сохранять как вектор признаков.

Также в качестве признаков распознавания можно использовать фазы пространственно частотного спектра, выбранные из верхних квадрантов. Фазы составляющих спектра Фурье являются признаками, инвариантными к освещенности изображения. Однако они очень чувствительны к смещению, поэтому в рамках задачи распознавания судов менее пригодны.

После определения способа выделения признаков объекта необходимо построить часть системы, которая отвечает за принятие решения в каждом отдельном случае распознавания. Для этого существует множество подходов, например нейронные сети, контурный анализ, морфологический анализ.

Одним из вариантов построения системы принятия решения является применение формулы условной вероятности [18], [19]:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}, \quad (4)$$

где $P(A|B)$ – вероятность возникновения события A при осуществлении события B ; $P(A)$ – вероятность события A .

Формула (4) позволяет оценить вероятность того, что событие может быть вызвано данной предпосылкой. При построении системы принятия решения можно оценить, с какой вероятностью наблюдаемый признак связан с некоторым событием. Однако изначальная форма этого подхода пригодна только в случае выделения одного признака при каждом распознавании. Очевидно, что такой подход не годится, ведь чем больше признаков, тем точнее будет принятое решение. Поэтому при построении систем принятия решения имеет смысл вычислять $P(B)$ по формуле полной

вероятности события, зависящего от нескольких несовместных гипотез, составляющих полную группу событий:

$$P(B) = \sum_{i=1}^N P(A_i)P(B | A_i). \quad (5)$$

В этом случае формула (4) примет следующий вид

$$P(A_j | B) = \frac{P(A_j)P(B | A_j)}{\sum_{i=1}^N P(A_i)P(B | A_i)}. \quad (6)$$

Формула (6) и есть формула Байеса. При этом вероятности под знаком суммы известны или могут быть оценены статистическим путем. В нашем случае для вычисления вероятностей каждого признака система должна в режиме обучения накапливать статистику по выявленным признакам при каждом распознавании.

Эффективность построенного распознавателя принято оценивать по вероятности допущения ошибок двух типов. Первый тип – это ошибочное принятие положительного решения, т.е. подтверждение класса объекта, который в действительности относится к другому классу. И второй тип это ошибочное отклонение решения, т.е. отвержение верного класса объекта [20].

Следовательно, при помощи систем распознавания образов можно автоматизировать многие аспекты производственного процесса, в частности, обработку судов в порту. Однако для построения эффективного распознавателя, следует учитывать множество факторов. Один из таких факторов – это выбор признаков для сравнения. Выбрав в качестве признаков для сравнения набор гармоник преобразования Фурье, можно добиться некоторой инвариантности к повороту объекта и обеспечить низкий уровень ошибок при распознавании. Такое решение допустимо в силу того, что суда в порт заходят примерно под одним углом и отклонения от обычной траектории будут незначительные.

Для осуществления принятия решения можно использовать Байесовский подход. Это позволяет создать простую и понятную структуру базы знаний и прозрачный механизм накопления и использования статистических данных.

В совокупности при использовании рассмотренных методов можно достичь высокой точности распознавания судов на основе радиолокационного сигнала и максимально снизить возможные возникновения ошибок обоих типов. При этом подход позволяет разработать простую структуру хранения и обработки данных, что дает системе преимущества как в ходе разработки и внедрения, так и в ходе эксплуатации.

Эксплуатация подобной системы будет разделена на две части – обучение и непосредственно распознавание. Причем значительное вмешательство персонала потребуется только на первом этапе. Так в режиме обучения система выделит вектор признаков на основе спектрального анализа данных РЛС, а эксперту в интерактивном режиме необходимо указать, к какому типу относится данный объект. После обработки значительной выборки система будет готова сама принимать решения, используя описанный алгоритм на основе теоремы Байеса. Причем в процессе работы системы эксперты могут проводить корректировку полученных данных. Необходимый объем выборки, позволяющий с заданной достоверностью принимать правильные решения, может быть определен в соответствии с рекомендациями, предложенными, например, в работах [2], [7], [11], [18], [20]. Таким образом, будет повышаться качество распознавания.

В конечном итоге использование описанного подхода позволяет добиться более строгого контроля технологических процессов в порту, а значит и увеличения производительности без пренебрежения качеством перегрузочных процессов на речном и морском транспорте. Это позволит вывести обработку водного транспорта на новый уровень безопасности.

Список литературы

1. *Нырков А. П.* Автоматизированное управление транспортными системами / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. А. Шнуренко. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 325 с.
2. *Нырков А. П.* Автоматизированное управление и оптимизация технологических процессов в транспортных узлах: дис. ... д-ра техн. наук. — СПб.: СПГУВК, 2003. — 304 с.
3. *Дулатов И. Н.* Современное состояние навигационных информационных систем / И. Н. Дулатов, А. П. Нырков // Материалы V межвузовской науч.-практ. конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 14 мая 2014 года. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — 2014. — С. 265–269.
4. *Нырков А. А.* Имитационное моделирование транспортных процессов / А. А. Нырков, А. П. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 2010. — 112 с.
5. *Нырков А.* Оценка погрешности коррелированных навигационных измерений / А. П. Нырков, А. Черненко // Речной транспорт (XXI век). — 2009. — № 5 (41). — С. 71–75.
6. *Нырков А. П.* Информационные технологии в обеспечении безопасности судоходства на внутренних водных путях / А. П. Нырков, А. А. Нырков // Материалы конференции «XIV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика — 2014» (РИ–2014)». — СПб.: СПОИСУ. — 2014. — С. 279.
7. *Нырков А. П.* Алгоритм управления движением судов, идущих пересекающимися курсами / А. П. Нырков, П. В. Викулин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 100–105.
8. *Викторов В. В.* Точность навигационных параметров как фактор безопасности малого флота / В. В. Викторов, А. А. Капустин, А. П. Нырков // IT: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА — 2013: материалы науч.-техн. конференции. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — 2013. — С. 89–93.
9. *Вихров Н. М.* О безопасности инфраструктуры водного транспорта / Н. М. Вихров, Ю. Ф. Каторин, А. П. Нырков [и др.] // Морской вестник. — 2014. — № 4 (52). — С. 99–102.
10. *Нырков А. П.* Контроль целостности данных при мониторинге транспортных средств / А. П. Нырков, Н. Ю. Вайгандт // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 54–61.
11. *Кузнецов В. Н.* Определение типа судна на основании радиолокационных данных / В. Н. Кузнецов, А. П. Нырков // «Информационные управляющие системы и технологии» (ИУСТ-Одесса-2014): Материалы междунар. науч.-практ. конференции, 23 – 25 сентября 2014 г. — Одесса. — 2014. — С. 82–84.
12. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.
13. *Кухарев Г. А.* Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека / Г. А. Кухарев. — СПб.: Политехника, 2001. — 240 с.
14. *Уидроу Б.* Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз. — М.: Радио и связь, 1989. — 440 с.
15. *Башмаков А. В.* Дискретная математика. Методы кодирования и обработки дискретных структур данных / А. В. Башмаков, Е. В. Зуров, А. П. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 2012. — 81 с.
16. *Дженкинс Г.* Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. — М.: Мир, 1971. — 549 с.
17. *Блейхут Р.* Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: пер. с англ. / Р. Блейхут. — М.: Мир, 1989. — 448 с.
18. *Истомин Е. П.* Методы теории вероятностей и математической статистики в моделировании транспортных процессов / Е. П. Истомин, Т. П. Кныш, А. П. Нырков [и др.]. — СПб.: СПГУВК, 1999. — 168 с.
19. *Шкадова А. Р.* Теория вероятностей / А. Р. Шкадова, А. П. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 2004. — 198 с.
20. *Нырков А. П.* Теория статистических решений. Статистическая проверка гипотез / А. П. Нырков, А. А. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 2006. — 60 с.

УДК 656.613

В. А. Фетисов,
д-р техн. наук, проф.;

Н. Н. Майоров,
канд. техн. наук, доц.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ МОРСКОЙ КОНТЕЙНЕРНОЙ ЛИНИЕЙ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

SOLUTION TO THE PROBLEM OF FORECASTING AND OPERATIONAL MANAGEMENT OF MARITIME CONTAINER LINES ON THE BASIS OF SIMULATION

Морские контейнерные перевозки грузов являются основной и лидирующей формой в системе транспортировки товаров. Выбор типа линии для каждого конкретного направления перевозок определяется характером грузопотока. Для уменьшения недочетов при решении прогнозных задач работы судов на линии необходимо прибегнуть к помощи имитационного моделирования с учетом как детерминированных, так и вероятностных процессов, возникающих при операционной деятельности судов на линии. Если детерминированные процессы можно определить на основе статистики, то учесть вероятностные процессы достаточно сложно. В статье предлагается имитационная модель морской контейнерной линии на примере компании Fesco в Санкт-Петербурге (Россия), приводится математическая модель и предлагается использование модели «следования за лидером» для описания движения судов. Основная задача, решаемая при моделировании, – достижение оптимального баланса между движением судов и решение группы прогнозных вопросов при изменении состава судов на линии.

Sea container transportations of cargoes are the main and leading form in the system of transporting goods. Select the line type for each direction of traffic is determined by the nature of the traffic. To reduce the slightest flaws in solving predictive problems of the courts on-line, you need to enlist the help of simulation taking into account both deterministic and stochastic processes arising from operating activities of vessels on the line. If deterministic processes can be determined on the basis of statistics, it is possible to consider stochastic processes is quite difficult. The paper proposes a simulation model of the marine container lines, on the example of a company Fesco in Saint Petersburg (Russia), the mathematical model and proposes using the model of “follow the leader” to describe the motion of ships.

Ключевые слова: морская контейнерная линия, грузопоток, моделирование работы кораблей, дискретное моделирование, модель следования за лидером, расписание движения судов, фидерная морская линия, регулярная морская линия.

Key words: sea container line, the traffic modeling of the operation of ships, discrete modeling, the model – following the leader, vessel schedules, marine feeder line, regular container shipping line.

Введение

Лучший способ избежать малейших недочетов при решении прогнозных задач работы судов на линии – прибегнуть к помощи имитационного моделирования. Применение имитационных моделей, в первую очередь, предназначено для решения задачи прогноза объемов грузоперевозок (TEU), задачи визуального моделирования движения судов, для внесения уточнения в расписание [1]. В случае выхода на рынок новой компании актуальна задача расчета необходимого количества судов для обеспечения требуемых грузоперевозок между портами. Актуальность применения имитационного моделирования работы контейнерных перевозок обоснована тем, что аналитические расчеты, не могут описать процесс со 100 % соответствием. Между тем, работа морской контейнерной линии представляет собой сложную систему, жизнедеятельность которой, определяется как достаточно четким расписанием, так и случай-

ными факторами (нарушение расписания прибытия судов – опоздание в рамках временного окна, ухудшение погодных условий, поломка судна). Имитационная модель описывает работу, принимая во внимание весь набор специфических условий, необходимых для выполнения отдельных операций с морской линией. [2] – [4]. Прогон модели годовой работы линии занимает минуты. Пользователь на модели выполняет так называемые сценарии «что – если» и в кратчайшие сроки осуществляет проверку нескольких вариантов функционирования работы контейнерной линии. При этом модель предоставляет не только конечный результат расчётов, но и позволяет наблюдать за движением судов, вводя в реальную базу данных данные о судах транспортной компании, а также за динамикой изменения показателей с течением времени. Для большей наглядности результаты моделирования представляются в графическом, табличном и текстовом виде. Виды моделирования, их классификация и особенности были приведены в [5], там же рассматривалась практическая задача определения необходимого количества кранов в зависимости от входного потока судов.

Вопросы выбора типа контейнерной линии для дальнейшего использования и реализации имитационной модели

Сегодня более 92 % мировых грузоперевозок генеральных грузов (грузов, транспортируемых в упаковке) на основных направлениях осуществляется в контейнерах. Морские контейнерные перевозки грузов являются основной и лидирующей формой в системе транспортировки товаров. Развитие мировой торговли, улучшение различных цепей поставок, формирование устойчивых территорий консолидации грузопотоков для портов приводило к появлению достаточного запаса грузов, чтобы организовать регулярное или линейное расписание движения судов.

Контейнерные морские перевозки образуют транспортную сеть. С общих позиций такая сеть характеризуется определенным набором инструментов управления движением потоков, она состоит из набора портов, связанных маршрутами движения по расписанию соответствующих транспортных судов.

Пример: схематичное представление организации работы контейнерных линий приведено на рис. 1 [6, С. 79]. В данном случае приведены линейное и трамповое судоходства.

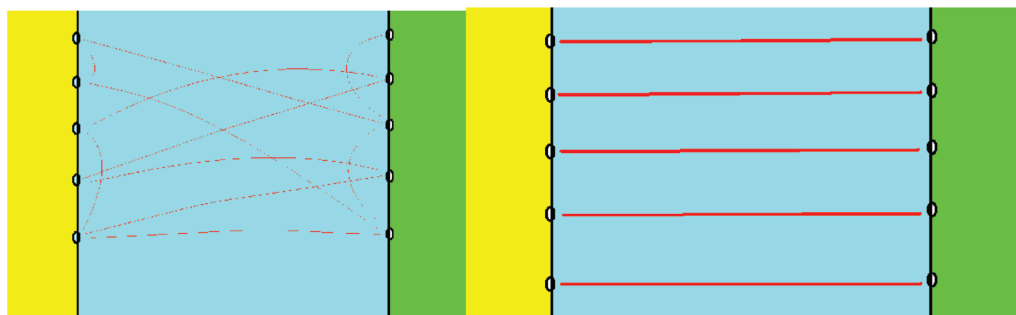


Рис. 1. Схематичное представление организации работы контейнерных линий

Наблюдается постоянный рост количества контейнерных судов, используемых для перевозки грузов. Это приводит к тому, что на достаточно длинных маршрутах контейнерных перевозок оправданным оказывается использование только крупных судов. Как следствие, для морской компании расписание движения судов связано с уменьшением частоты сервиса и, в результате, с некоторыми неудобствами для заказчика. На сегодняшний день можно сказать, что контейнерные перевозки стали клиентоориентированным бизнесом. Невозможность динамичного развития грузовой базы не позволяет в каждом порту по пути следования контейнеровоза организовать регулярное накопление грузов соответствующих размеров. Поэтому тенденция рационализации маршрутов приняла характер консолидации магистральных контейнерных линий, связывающих между собой порты и системы доставки грузов в эти порты морскими маршрутами. К примеру,

для перемещения груза между определенными портами могут использоваться специально созданные параллельные маршруты из нескольких линий, чтобы в совокупности поддержать требуемое расписание движения судов.

Расписание движения судов контейнерных линий предусматривает обслуживание заданного большого числа портов и минимальное транзитное время для основных грузопотоков за счет организации движения судов по нескольким определенным схемам, либо организации специализированных фидерных линий. Фидер – в морских контейнерных перевозках этим словом обозначают контейнерную линию, осуществляющую перевозку местного назначения внутри ограниченного водного бассейна. Многие крупные морские судоходные линии имеют свои собственные фидерные суда или используют заранее забронированные места на судах других перевозчиков. Фидерные перевозки особенно востребованы в мелководных регионах, где осадка больших океанских контейнеровозов просто не позволяет им подойти к причалу [7], [8].

Регулярные судовые линии отвечают основным требованиям по качеству морских транспортных услуг. Они позволяют транспортным компаниям максимально сократить резерв провозной способности контейнерных судов и оперативно регулировать движение судов на линии с учетом изменения обстановки в отдельных портах. Уточненное расписание может предусматривать замену одного судна другим с близкими характеристиками, введение в схему нового рейса или дополнительного порта, изменения дат прихода, либо отхода судов в отдельные порты [6], [9].

Любая судовая контейнерная линия характеризуется следующими переменными:

- номером;
- временем кругового рейса;
- количеством перевозок за навигацию (в случае особых географических условий);
- количеством работающих контейнерных судов;
- пунктами отправления и назначения;
- типом перевозимого груза;
- типами судов, образующих флот, и их загрузкой;
- расписанием движения судов;
- временем работы на контейнерной линии.

Коммерческие условия работы линий определяются необходимостью конкурировать с другими морскими транспортными компаниями. Для каждой отдельной линии разрабатывается своя система ставок [4], [6]. Примерно 75 % современного линейного судоходства приходится именно на контейнерные перевозки. На контейнерных линиях Европа – Восток используются сверхбольшие контейнеровозы вместимостью более 15000 TEU's. Поэтому использование таких судов привело к коренному изменению всей системы контейнерных линейных перевозок. Как следствие, эффективная эксплуатация сверхкрупных контейнеровозов требует максимального сокращения порожних плаваний. Такие контейнерные суда в каждом из обслуживаемых районов заходят только в крупные порты. Остальные перевозки осуществляются фидерными линиями, на которых работают собственные или арендуемые суда.

Аналитические данные по грузообороту и работе морских линий на Северо-Западе России

Объем грузооборота морских портов России в январе 2015 г. составил 52,9 млн т, что на 12,2 % превышает аналогичный показатель 2014 г. Об этом сообщает пресс-служба Ассоциации морских торговых портов России. В портах Балтийского бассейна объем перевалки грузов увеличился до 19,1 млн т (+14,1 %), из них перегрузка сухогрузов составила 6,7 млн т (+8,6 %), наливных — 12,4 млн т (+17,3 %). Увеличился объем перевалки грузов в портах Усть-Луга до 7,0 млн т (+27,3 %), Приморск до 5,4 млн т (+15,9 %), Высоцк — до 1,3 млн т (+14,0 %), Калининград — до 1,2 млн т (+17,5 %). В то же время грузооборот Большого порта Санкт-Петербург снизился до 4,1 млн т (–4,2 %). Схема основных маршрутов работы Балтийского региона приведена на рис. 2. Оконная форма представлена из системы мониторинга движения судов [1].

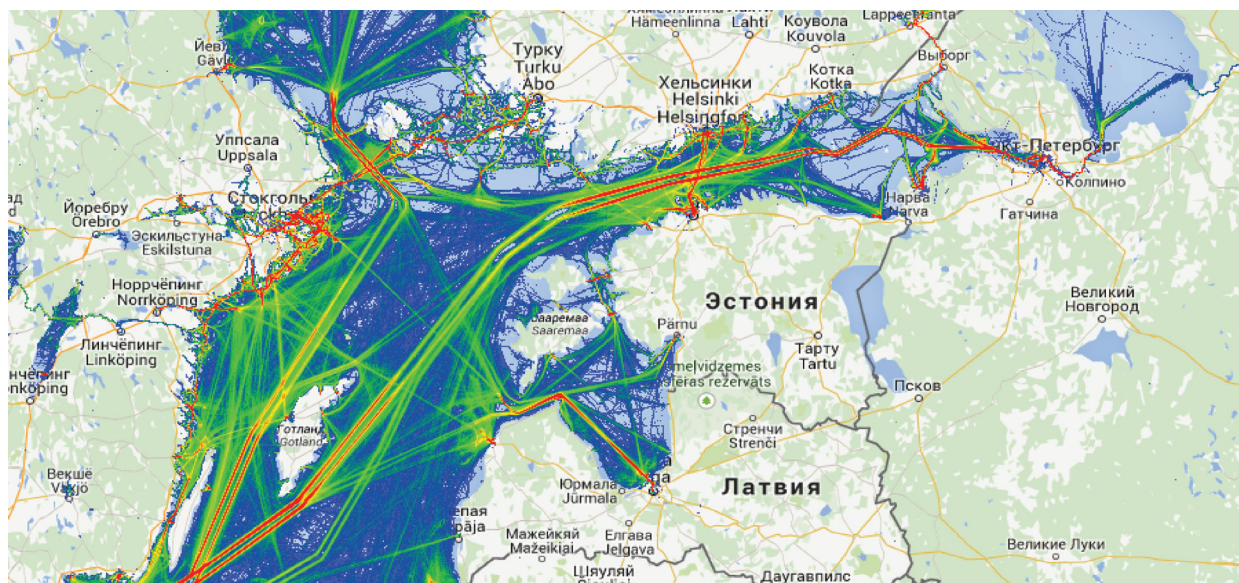


Рис. 2. Схема основных маршрутов работы Балтийского региона.

Источник: <http://portnews.ru/news/194699/>

Известно что, ни один сверхкрупный контейнеровоз не заходит в порты Балтийского моря (России, стран Балтии). В Санкт-Петербург перевозят грузы в контейнерах около 15 океанских линий. Данные линии имеют в Санкт-Петербурге своих грузовых агентов, а четыре линии — свои представительства [10], [11].

Описание математической модели

Эффективность работы контейнерной линии может быть достигнута, если порожние заходы судов будут сведены к минимуму и будет обеспечено наилучшее использование разных типов контейнерных судов по грузоподъемности. Для реализации поставленных задач необходимо определять структуру и размер имеющихся в компании судов. На стратегическом и тактическом уровне управления работой морской контейнерной можно выделить следующие задачи:

1. определение структуры и требуемого размера контейнерных судов;
2. составление оптимальных маршрутов движения судов;
3. составление оптимального расписания движения судов.

Структурировать контейнерные суда руководитель компании может по любым из многочисленных характеристик судна, влияющих на экономический результат его работы, основные из которых: грузоместимость (грузоподъемность), скорость движения, расход топлива, стоимость расходов, потребности в техническом обслуживании и ремонте и т.д. Однако у перевозчика растет доходная часть при увеличении такого параметра как грузоместимость, и одновременно подвергаются изменениям в сторону увеличения затрат все остальные параметры. Для реализации задач оперативного управления, либо прогнозирования работы контейнерной линии предлагается ввести следующую схематичную классификацию судов по соответствующим классам с учетом вместимости контейнеров для перевозки (рис. 3).

На практике за основной критерий анализа принимают различные экономические показатели работы контейнерной линии. В качестве критерия оптимальности, с экономической точки зрения, может быть использована сумма всех расходов по флоту за время рейса судна.

На практике такая задача решается методом линейного программирования, методом потенциалов, симплекс-методом.

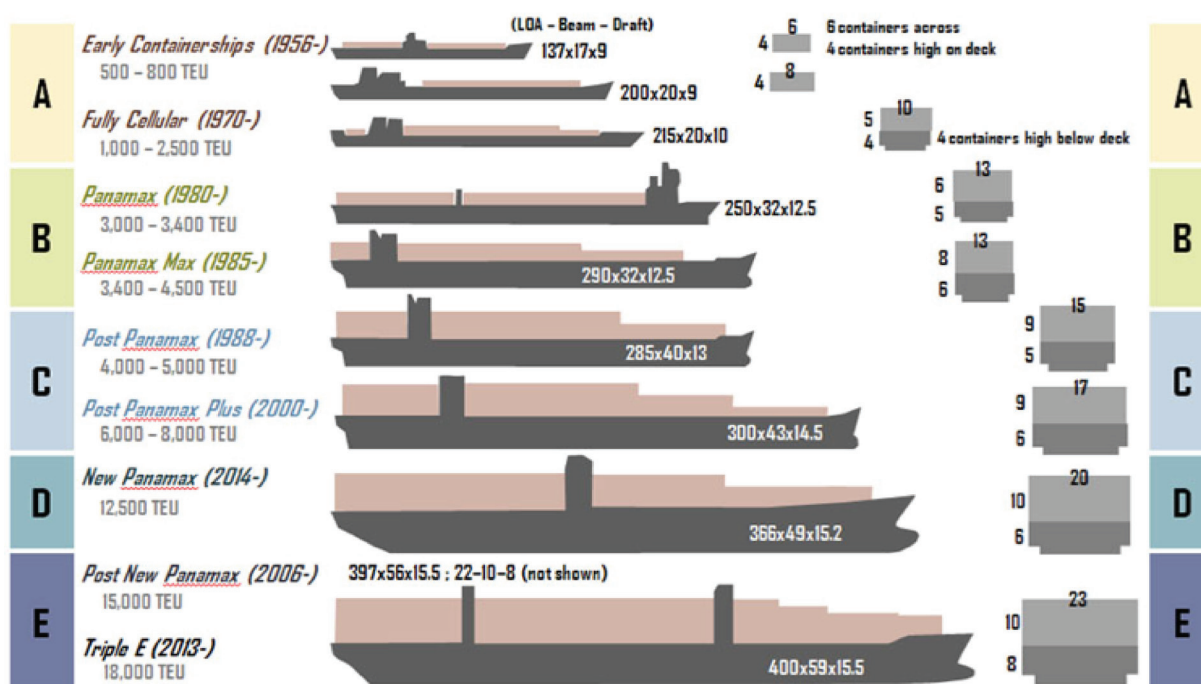


Рис. 3. Схематическая классификация судов для имитационной модели

Построение экономико-математической модели задачи минимизации можно представить в общем виде как

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i (i = \overline{1, m}); \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j (j = \overline{1, n}); \quad x_{ij} \geq 0, (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}), \quad (2)$$

где x_{ij} — параметр управления, который отражает величину грузоместимости идущего в балласте судна из i -го порта с избытком груза в j -ый порт с его недостатком; W_{ij} — расстояние между портами i и j ; a_i — запасы груза в i -ом порту; b_j — необходимое количество груза в j -ом порту.

Можно задачу сформулировать следующим образом: количество груза, подаваемое на i -ый грузопоток должно быть равно количеству потребной грузовой вместимости, необходимой для освоения перевозок на заданном направлении. При этом целевая функция удовлетворяет следующим условиям:

- 1) расходы по флоту должны быть минимальными;
- 2) загрузка судов должна быть максимальной;
- 3) порожние пробеги и время на них должно быть сведено к минимуму.

Недостатком данной модели является множество ограничений, которые нужно задавать, а при изменении показателей одного судна выполнять пересчет снова. Гораздо практичнее использовать имитационные модели для исследования контейнерных линий. Визуализация модели движения судов может быть записана с помощью концепции модели «следования за лидером» (рис. 4) [12].

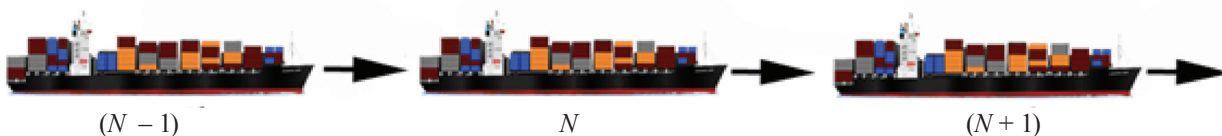


Рис. 4. Схематическое представление модели следования за лидером

На рис. 4 N — номер судна работающего на контейнерной линии. Предполагается, что каждое судно согласует свою скорость со скоростью впереди идущего судна в соответствии с расписанием и схематичным представлением. Движение судна может быть описано в виде

$$\ddot{X}(t) = \frac{1}{\tau} (\dot{X}_i(t) - \dot{X}_{i+1}(t)), \quad (3)$$

где τ — время согласования движения судов.

Данная модель предлагается авторами для реализации в имитационной модели.

Алгоритм имитационной модели и исходные данные для реализации

Основной алгоритм реализации имитационной модели можно разделить на два этапа. Первый этап состоит из анализа статистической информации о типах судов и объемах перевозок и завершается формированием входных параметров для имитационной модели. Второй этап состоит из программной реализации и проработки механизма включения морской контейнерной линии в имитационную модель. Дополнительно в модели нужно учитывать следующие параметры:

- интенсивность движения судов в месяц из порта A в порт B ;
- интенсивность движения судов из порта B в порт A ;
- среднее время обслуживания (Порт 1);
- среднее время обслуживания (Порт 2).

Объектом исследования выбрана компания *Fesco (FESCO ESF)*. Контейнерные перевозки являются основой бизнеса группы *Fesco*. Компания осуществляет доставку контейнеров, используя интермодальные схемы, либо организует отдельно морские контейнерные перевозки и железнодорожные отправки. Наиболее важны транзитные коридоры и экспортно-импортные маршруты *Fesco* [10].

Фрагмент реального расписания движения судов компании *Fesco* с указанием, в качестве примера судна «Violetta», приведен на рис. 5. Судно стояло под разгрузку в порту Санкт-Петербург 22 февраля 2015 г.



Дата последнего обновления: 16.02.2015

ЛОКАЦИИ		СУДНО / РЕЙС									
		E.R.RIGA	VIOLETTA	RJNBORG	VORONEZH	E.R.VISBY	VIONA	JONNI RITSCHER	E.R.RIGA	VIOLETTA	RJNBORG
		15023	15024	15025	V1501	15027	15028	15029	15031	15032	15033
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ погрузка	ETS	Вс, 08.02.2015	Вт, 10.02.2015	Пт, 13.02.2015		Вс, 15.02.2015	Пн, 16.02.2015	Чт, 19.02.2015	Сб, 21.02.2015	Пн, 23.02.2015	Пт, 27.02.2015
	ETA			Ср, 18.02.2015				Ср, 25.02.2015	Пт, 27.02.2015		Ср, 04.03.2015
РОТТЕРДАМ разгрузка / погрузка	ETS			Чт, 19.02.2015	Пт, 13.02.2015			Чт, 26.02.2015	Вс, 01.03.2015		Чт, 05.03.2015

Рис. 5. Фрагмент расписания судозаходов
фидерных линий *Fesco* в порт Санкт-Петербург

Моделирование работы контейнерной линии

На основе входных данных создания интерфейса на ввод различных судов (как предлагается на рис. 3) и разработанного алгоритма была создана имитационная модель. Фрагмент имитационной модели, реализованной в среде Anylogic, представляющий движение судов, приведен на рис. 6. На рис. 6 представлены следующие объекты: 1 — (Source) генератор заявок; 2 — (Queue) очередь; 3 — (Conveyor) транспортный поток; 4 — (Delay) генератор задержек; 5 — (Sink) удаление заявок.

Генератор заявок создает заявки в соответствии с начальным расписанием. В данной имитационной модели заявками являются суда. Здесь используются пять типов судов в зависимо-

сти от грузовой вместимости. В модель внесена возможность реализации работы в двух направлениях. На каждый генератор поступают данные о количестве судов определенного типа, работающих на линии. Заявки образуют очередь. Очередь образует транспортный поток. При обработке судна в порту появляется задержка по времени, причем в систему можно внести как вероятность задержки, так и точные данные. В момент, когда судно прибывает в порт назначения, заявка в системе удаляется.

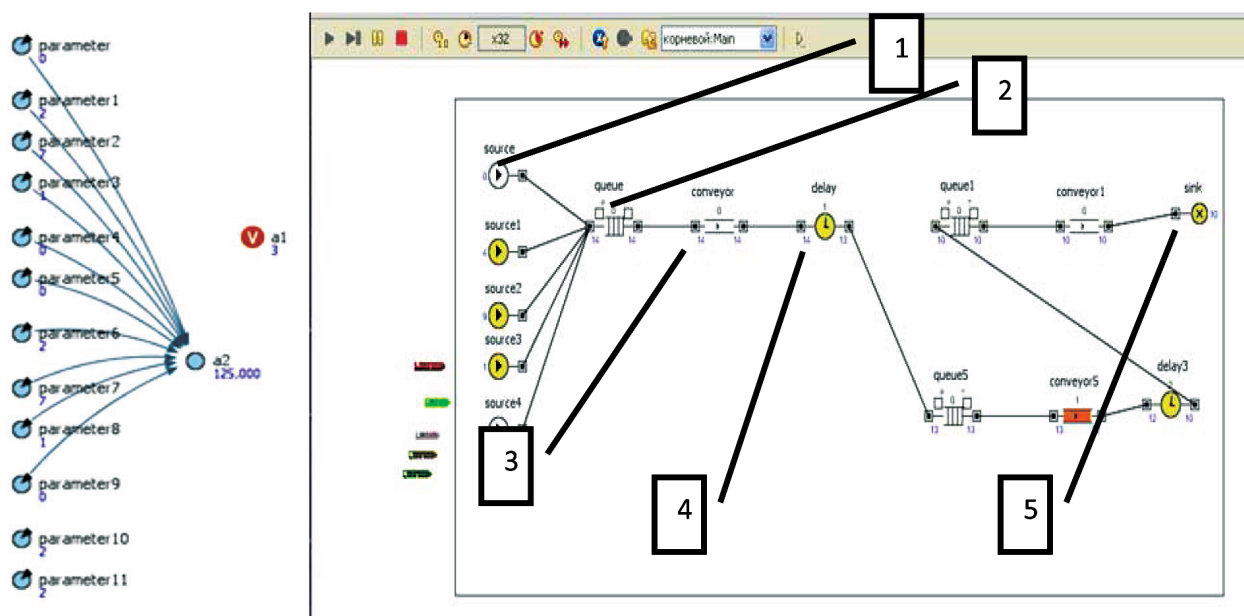


Рис. 6. Структура имитационной модели работы контейнерной линии

На основе имитационной модели можно строить различные прогнозные задачи. В модели реализована возможность добавления новых судов к уже работающим на линии (рис. 7).

Таблица 1

Исходные данные для моделирования и результаты эксперимента

Класс судов	Класс А 500–2500 TEU	Класс В 3000–4500 TEU	Класс С 4000–8000 TEU	Класс D 12500 TEU	Класс Е 15000–18000 TEU	Расчетное количество судов	Расчетный грузопоток в TEU
Запуск 1				1		1	25000
Запуск 2			3	1		4	61000
Запуск 3		2	6	1		9	113000
Запуск 4			4	1		5	73000
Запуск 5			2	1		3	49000
Запуск 6		2	4	1		7	89000
Запуск 7			1	1		2	37000
Запуск 8		1	4	1		6	81000
Запуск 9		2	5	1		8	101000
Запуск 10		2	7	1		10	125000

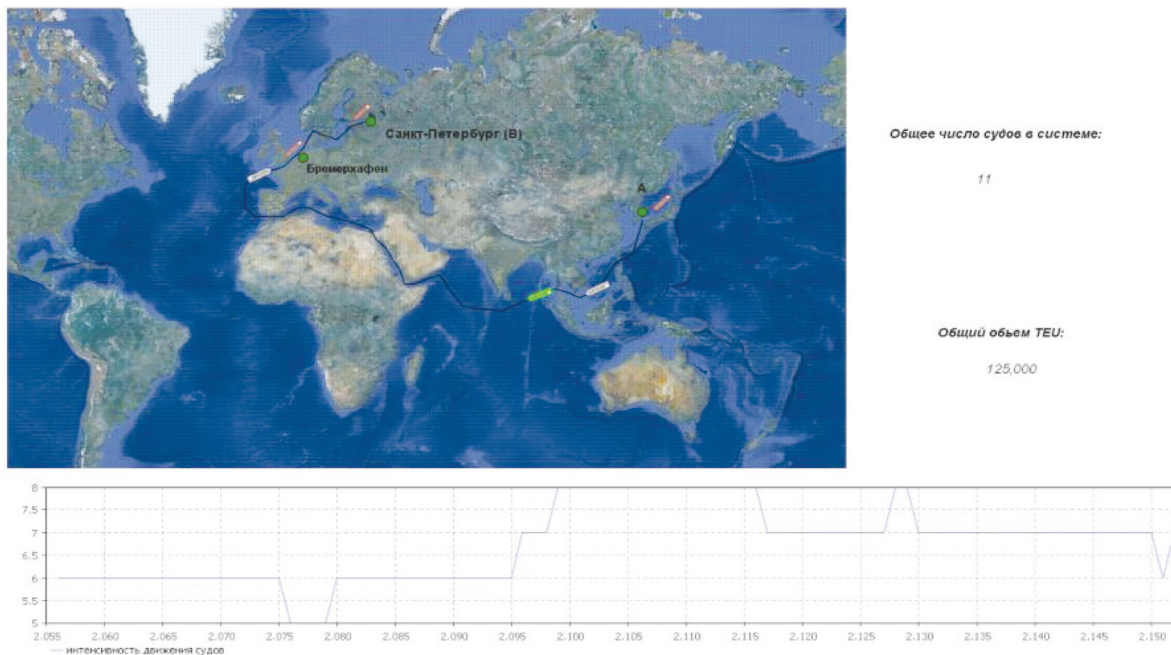


Рис. 7. Оконная форма имитационной модели работы одной линии *Fesco*

Результат моделирования

В результате реализации имитационной модели (на основе линии *Fesco*), при работе 10 судов грузопоток составил 125000 TEU's. Также имитационная модель была протестирована при условии работы сразу двух различных линий в одном направлении, максимальный грузопоток оказался равным 161000 TEU's. Получилось, что для данной линии необходимо задействовать 16 судов различных классов, а именно три судна класса А (500 – 2500 TEU's), пять судов класса В (3000 – 4500 TEU's), семь судов класса С (4000 – 8000 TEU's) и одно судно класса D (125000 TEU's). Итоговый грузопоток приведен на рис. 8.

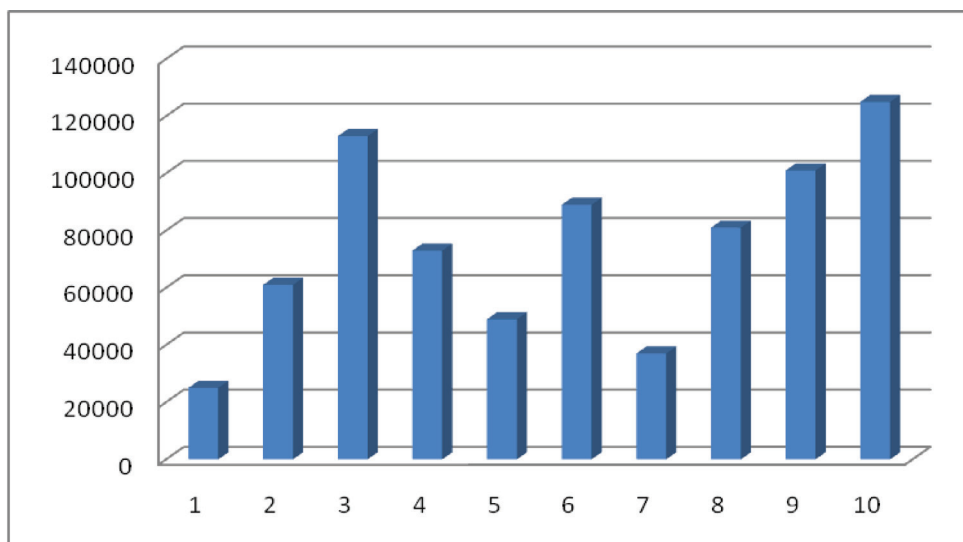


Рис. 8. График изменения грузопотока

Заключение

Проведенное исследование направлено на разработку имитационной модели работы морской контейнерной линии, которая в последующем должна использоваться как для решения

группы прогнозных задач, так и для принятия оперативных решений по операционной деятельности. Рассматриваемая имитационная модель содержит возможность внесения различных задержек в работе контейнерной линии (задержку в погрузке, поломку и т.д.), содержит реализованные входные интерфейсы по заданию типов судов на основе их грузовой вместимости. Исходными данными было выбрано расписание движения судов реальной контейнерной линии *Fesco*. Необходимо отметить, что созданная разработка может быть использована для любой морской транспортной компании, которая осуществляет фидерное, регулярное, либо линейное судодоходство.

В статье предлагается возможность реализации такого метода как «модель следования за лидером». Авторы расширяют возможность применения данного метода для реализации различных задач моделирования в транспортной отрасли. В результате исследования и экспериментирования с добавлением новых судов на линии, в зависимости от грузопотока, получаются графики загруженности линии, прогнозируются объемы перевозок, появляется возможность исследования различных задержек в работе. Дополнительно можно сказать, что при замене модельного времени на реальное можно создать интерактивную имитационную карту движения судов, которая будет работать в режиме «реального времени».

Список литературы

1. Фетисов В. А. Практические задачи моделирования транспортных систем / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров. — СПб.: ГУАП, 2012. — 185 с.
2. Рыжиков Ю. А. Имитационное моделирование. Теория и технологии. / Ю. А. Рыжиков. — Альтекс, 2004. — 384 с.
3. Кириченко А. В. Развитие логистики в современных транспортных условиях / А. В. Кириченко, О. А. Деняк // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 3 (49). — С. 3–5.
4. Фетисов В. А. Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 3–7.
5. Fetisov V. A. System Approach to the Simulation of Transport Infrastructure of Container Terminals / V. A. Fetisov, N. N. Maiorov // Our Sea, International Journal of Maritime Science & Technology. — 2015. — № 5–6. — P. 102–105.
6. Кириченко А. В. Введение в транспортную логистику / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов, О. А. Ражев [и др.] — СПб.: ГУАП, 2011. — 228 с.
7. Mangan J. Global Logistics and Supply Chain Management / J. Mangan, Ch. Lalwani, T. Butcher, R. Javadvpour. — Wiley, 2 edition, 2011. — 446 p.
8. Song D.-W. Maritime Logistics: A Complete Guide to Effective Shipping and Port Management / D.-W. Song, Ph. M. Panayides. — Kogan Page, 2012. — 344 p.
9. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems / J.-P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack. — Routledge 3 edition. — 2013. — 432 p.
10. Расписание судозаходов фидерных линий в порт Санкт-Петербург. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.credotrans.ru/ru/port_forwarding/fidernye_linii_v_portu_spb (дата обращения — 22.02.2015).
11. Маринич А. Н. Судовая автоматическая идентификационная система АИС. / А. Н. Маринич [и др.]. — М.: Судостроение, 2004. — 180 с.
12. Фетисов В. А. Моделирование транспортных процессов. / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров. — СПб.: ГУАП, 2011. — 165 с.

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ПОЛИГРАФА НА ОСНОВЕ ВИДЕО И АУДИО ДАННЫХ

TESTING THE HYPOTHESIS OF CREATING A DIGITAL POLYGRAPH BASED ON VIDEO AND AUDIO DATA

В данной статье проводится проверка гипотезы возможности создания цифрового полиграфа на основе видео и аудио информации. Суть гипотезы заключается в том, что с развитием технологий, особенно информационных, появляется возможность за счет обработки видео и аудио информации обнаружить трансляцию правды/лжи, исходящую от человека. Предложенное решение может применяться для создания скрытых полиграфов, которые будут незаметны для испытуемых. Скрытые полиграфы позволят руководителям кадровых служб и служб безопасности судоходных компаний, портов и других объектов транспортной инфраструктуры убедиться в достоверности информации, предоставляемой сотрудниками, ответственными за транспортную безопасность. В данной статье описывается эксперимент получения видео и аудио данных с заведомо известной трансляцией правды/лжи. На основе кластерного анализа были выявлены информативные и неинформативные признаки, которые могут быть исключены из цифрового полиграфа как ненужные. Также были выявлены на основе анализа аудио-видео временные промежутки трансляции правды/лжи.

In this paper carried out to test the hypothesis the possibility of creating digital printing based on video and audio information. The essence of the hypothesis is that the development of technologies, especially information, it is possible due to the processing of video and audio data to detect broadcast of truth or lies emanating from the man. The proposed solution can be used to create a hidden polygraphs, which will be invisible to the subjects. Hidden polygraphs allow personnel managers and security of shipping companies, ports and other transport infrastructure to ensure the reliability of information provided to staff responsible for road safety. This article describes the experiment data acquisition video and audio data with a known translation of the well-known truth or lies. On the basis of cluster analysis identified informative and non-informative features that can be excluded from the digital polygraph as unnecessary. Just been identified based on the analysis of audio-video broadcast time intervals of truth or lies.

Ключевые слова: полиграф, кластерный анализ, видео, аудио.

Key words: polygraph, cluster analysis, video, audio.

Введение

Международный кодекс по охране судов и портовых средств (Кодекс ОСПС) предъявляет ряд требований к должностным лицам компаний и лицам командного состава, ответственных за охрану судов и портовых средств. Данные лица должны обладать достаточными знаниями и способностями для выполнения возложенных на них обязанностей [1].

Федеральным законом от 09.02.2007 г. №16-ФЗ «О транспортной безопасности» поставлена задача подготовки и аттестации сил обеспечения транспортной безопасности. Ст. 10 Закона запрещает выполнение работ, непосредственно связанных с обеспечением транспортной безопасности, лицам, имеющим непогашенные или неснятые судимости, состоящим на учете по поводу психических заболеваний, имеющим медицинские противопоказания, причастным к экстремистской деятельности и терроризму, сообщившим заведомо ложные сведения о себе при приеме на работу [2].

Опасность проникновения таких лиц в структуры обеспечения транспортной безопасности очевидна. Современные методы проверки персонала при приеме на работу, используемые кадровыми службами, не всегда позволяют выяснить степень достоверности предоставляемых работником данных о себе. Поэтому создание условий для скрытого контроля, правдивости предоставляемой на собеседовании информации от лиц, принимаемых на должности, связанные с вопросами транспортной безопасности, является актуальной задачей.

С развитием технологий, особенно информационных, появляется возможность создания цифровых полиграфов, использующих такую информацию как видео и аудио запись. Как известно, полиграф – это некое устройство (техническое), направленное на регистрацию психофизиологических реакций организма человека на трансляцию правды/лжи.

Целью работы была проверка гипотезы о возможности создания цифрового полиграфа, работающего на основе аудио и видео данных. В ходе эксперимента, были поставлены следующие задачи:

- 1) создание базы данных экспериментов с набором различных признаков трансляции правды/лжи;
- 2) проведение обезличивания базы данных с последующей ее подготовкой для проведения статистического анализа;
- 3) выбор подходящего метода проведения статистического анализа из числа возможных;
- 4) на основе статистических данных определение информативных и не информативных признаков;
- 5) определение временных интервалов трансляции правды/лжи.

Создание базы данных производилось путем записи на видео со звуком разговора с человеком на различные темы. Во время этих разговоров человек в определенный момент времени начинал лгать. После записи видео происходила его обработка и дальнейшее преобразование в набор цифровых данных в формат MS Excel (xls). Этих данных оказалось достаточно для проведения статистического анализа [3].

На основе поставленных задач и полученных данных был проведен краткий обзор основных методов статистического анализа, в число которых входят: корреляционный анализ, регрессионный анализ, канонический анализ, методы сравнения средних, частотный анализ, кросстабуляция, анализ соответствий, кластерный анализ, дискриминантный анализ, факторный анализ, деревья классификации, анализ главных компонент и классификация, многомерное шкалирование, моделирование структурными уравнениями, методы анализа выживаемости, временные ряды, нейронные сети [4].

Из всех указанных методов наиболее подходящими для решения поставленной задачи являются кластерный анализ и факторный анализ. Оба метода являются разделами многомерного статистического анализа.

Главными целями факторного анализа являются: сокращение числа переменных (редукция данных) и определение структуры взаимосвязей между переменными, т.е. классификация переменных. Поэтому факторный анализ используется или как метод сокращения данных, или как метод классификации.

Главной целью кластерного анализа является группировка многомерных объектов, основанная на представлении результатов отдельных наблюдений точками подходящего геометрического пространства с последующим выделением групп как сгустков этих точек (кластеров, таксонов).

Кластерный анализ реализует задачу сведения множества характеристик к небольшому ряду обобщающих итогов, выражающих действительно существенные для явления различия, позволяя при этом избежать отсека большинства признаков и возвращения к классической мало-размерной задаче. Именно поэтому кластерный анализ был выбран как основной метод реализации поставленной задачи.

Математическая основа кластерного анализа N измерений $X_1, X_2, \dots, X_n$ могут быть представлены в виде матрицы

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_n] = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Аналогичным образом расстояния между парами векторов $d(X_i, X_j)$ могут быть представлены в виде матрицы расстояний

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$d_{ii} = 0$, для $i = 1, 2, \dots, n$.

Если признаки измерены в разных единицах, то определить расстояние между объектами нельзя. Тогда применяется нормировка показателей, переводящая их в безразмерные величины. Наиболее распространенные способы нормирования следующие:

$$z1 = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}; \quad z2 = \frac{X}{\bar{X}}; \quad z3 = \frac{X}{X_{\max}}; \quad z4 = \frac{X - \bar{X}}{X_{\max} - X_{\min}}. \quad (3)$$

Понятием, противоположным понятию расстояния между объектами X_i и X_j , является понятие близости (сходства) между X_i и X_j . Точнее, мера близости между объектами X_i и X_j – это вещественная функция $\mu(X_i, X_j) = \mu_{ij}$ со свойствами:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \mu(X_i, X_j) < 1 \text{ для } X_i \neq X_j; \\ \mu(X_i, X_i) &= 1; \\ \mu(X_i, X_j) &= \mu(X_j, X_i). \end{aligned} \quad (4)$$

Пары значений мер близости можно объединить в матрицу близости

$$\mu = \begin{bmatrix} 1 & \mu_{12} & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & 1 & \mu_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$\mu_{ij} = 0$ для $i = 1, 2, \dots, n$.

Величину μ_{ij} называют коэффициентом близости. Примером линейной близости является коэффициент корреляции. Рассмотрим основные способы определения расстояний между объектами.

Метрики для количественных шкал (расстояние)

а) линейное расстояние

$$d(X_j, X_i) = \sum_{k=1}^N |x_{ki} - x_{kj}|; \quad (6)$$

б) Евклидово расстояние

$$d(X_j, X_i) = \left[\sum_{k=1}^N (x_{ki} - x_{kj})^2 \right]^{1/2}; \quad (7)$$

в) обобщенное степенное расстояние Минковского (универсальная метрика)

$$d(X_j, X_i) = \left[\sum_{k=1}^N (x_{ki} - x_{kj})^p \right]^{1/p}. \quad (8)$$

Метрики для качественных шкал (мера близости)

К качественным шкалам относят:

- а) номинальную шкалу (или шкалу наименований). Примеры измерения: пол (мужчина, женщина), национальность (француз, итальянец, немец), профессия (учитель, врач, бухгалтер) и др.;
- б) порядковую шкалу (или ранговую, ординарную). Примеры измерения: экспертные ранжировки, оценки предпочтений, шкала твердости минералов и др.

Расстояние для номинальных шкал вводится следующим образом. Пусть имеются два объекта X и Y с N признаками. Введем координаты x_i и y_j ($i = 1, 2, \dots, N$) как логические переменные, принимающие значение 1, если объект обладает 1-м признаком, и 0, если признак с номером 1 у объекта отсутствует.

Рассмотрим возможные способы точного определения кластеров:

- Класс типа сгущения (класс типа ядра): все расстояния между объектами внутри класса меньше любого расстояния между объектами класса и остальной частью множества.
- Класс с центром: класс называется классом с центром, если существует порог и некоторая точка x_i^* в пространстве, занимаемом объектами кластера S_1 со свойствами:

$$\tau > 0; \text{ если } d_{ix^*} \leq \tau, \text{ то } x_i \in S_1; \text{ если } d_{ix^*} > \tau, \text{ то } x_i \notin S_1. \quad (9)$$

Точка x_i^* называется *центром класса*. Часто в качестве x_i^* рассматривается центр тяжести, т.е. координаты центра определяются как средние значения признаков у объектов класса.

Далее, пусть $X = \{X_1, X_2, \dots, X_{n_1}\}$ – множество измерений, произведенных над множеством объектов $I = \{I_1, I_2, \dots, I_{n_2}\}$, а $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_2}\}$ – множество измерений, соответствующее множеству $J = \{J_1, J_2, \dots, J_{n_2}\}$.

Величину $D = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} (\bar{X} - \bar{Y})^T (\bar{X} - \bar{Y})$, где $\bar{X} = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{X_i}{n_1}$ и $\bar{Y} = \sum_{i=1}^{n_2} \frac{Y_i}{n_2}$, называют *расстоянием*

между кластерами I и J . Формула вычисления расстояния между кластерами используется как один из параметров в алгоритмах кластерного анализа.

На первом шаге, когда каждый объект представляет собой отдельный кластер, расстояния между этими объектами определяются выбранной мерой. Далее необходимо правило объединения или связи для двух кластеров. Здесь имеются различные методы, в число которых входит метод k -средних.

Использование данного метода предполагает, что исследователь имеет гипотезу относительно числа кластеров (по наблюдениям или по переменным). В таком случае создается ровно k различных кластеров, расположенных на возможно больших расстояниях друг от друга. В качестве меры близости используется Евклидово расстояние:

$$p(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{p=1}^n (X_p - Y_p)^2}, \quad (10)$$

где $x, y \in R^n$.

Итак, рассмотрим ряд наблюдений $(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)})$, $x^{(j)} \in R^n$.

Метод k -средних разделяет m наблюдений на k групп (или кластеров)

$$(k \leq m), S = (S_1, S_2, \dots, S_k),$$

чтобы минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центроидов этих кластеров:

$$\min \left[\sum_{i=1}^k \sum_{x^{(j)} \in S_i} \|x^{(i)} - \mu_i\|^2 \right], \quad (11)$$

где $x^{(i)} \in R^n$, $\mu_i \in R^n$; μ_i – центроид для кластера S_i .

Алгоритм

Итак, если мера близости до центроида определена, то разбиение объектов на кластеры сводится к определению центроидов этих кластеров. Число кластеров k задается исследователем заранее.

Рассмотрим первоначальный набор k средних (центроидов) $\mu_1, \dots, \mu_k$ в кластерах $S_1, \dots, S_k$. На первом этапе центроиды кластеров выбираются случайно или по определенному правилу (например, можно выбрать центроиды, максимизирующие начальные расстояния между кластерами).

Относим наблюдения к тем кластерам, чье среднее (центроид) к ним ближе всего. Каждое наблюдение принадлежит только к одному кластеру, даже если его можно отнести к двум и более кластерам. Затем центроид каждого i -го кластера перевычисляется по следующему правилу:

$$\mu_i = \frac{1}{s_j} \sum_{x^{(j)} \in S_i} x^{(j)}. \quad (12)$$

Таким образом, алгоритм k -средних заключается в перевычислении на каждом шаге центроида для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге. Алгоритм останавливается, когда значения μ_i не меняются: $\mu_i^{\text{шаг } t} = \mu_i^{\text{шаг } t+1}$.

Важно отметить, что неправильный выбор первоначального числа кластеров k может привести к некорректным результатам. Именно поэтому при использовании метода k -средних важно сначала провести проверку подходящего числа кластеров для данного набора данных.

С применением данного метода была обработана полученная база данных, состоящая примерно из 50 экспериментов. На основе обработанных данных:

- получены информативные и неинформативные признаки, определены временные интервалы трансляции правды/лжи;
- выбраны двух и четырехкластерный анализ как наиболее подходящие для решения поставленной задачи (рис. 1, 2).

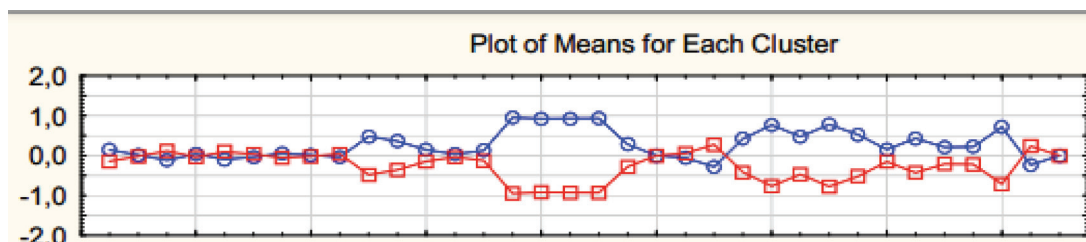


Рис. 1. Пример двухкластерного анализа для одного из экспериментов

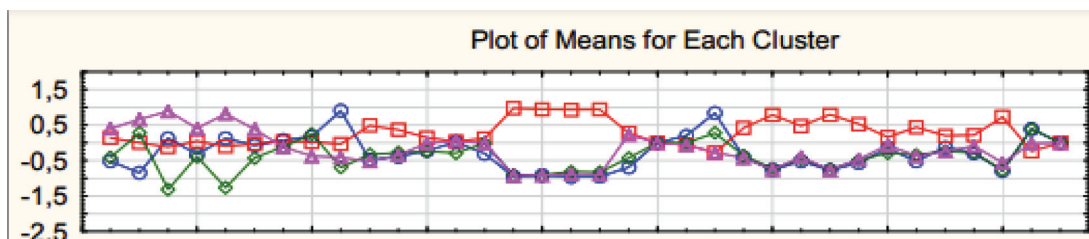


Рис. 2. Пример четырехкластерного анализа для одного из экспериментов

Для каждого исследования кластеры формировались отдельно. И, поскольку в кластере сохраняются моменты времени, то во всех случаях они разные, так как каждый испытуемый выдавал ложную/правдивую информацию разное количество времени.

Диаграмма, представленная ниже, основана на анализе полученных данных (49 файлов) методом кластерного анализа, она отображает степень информативности признаков (рис. 3).

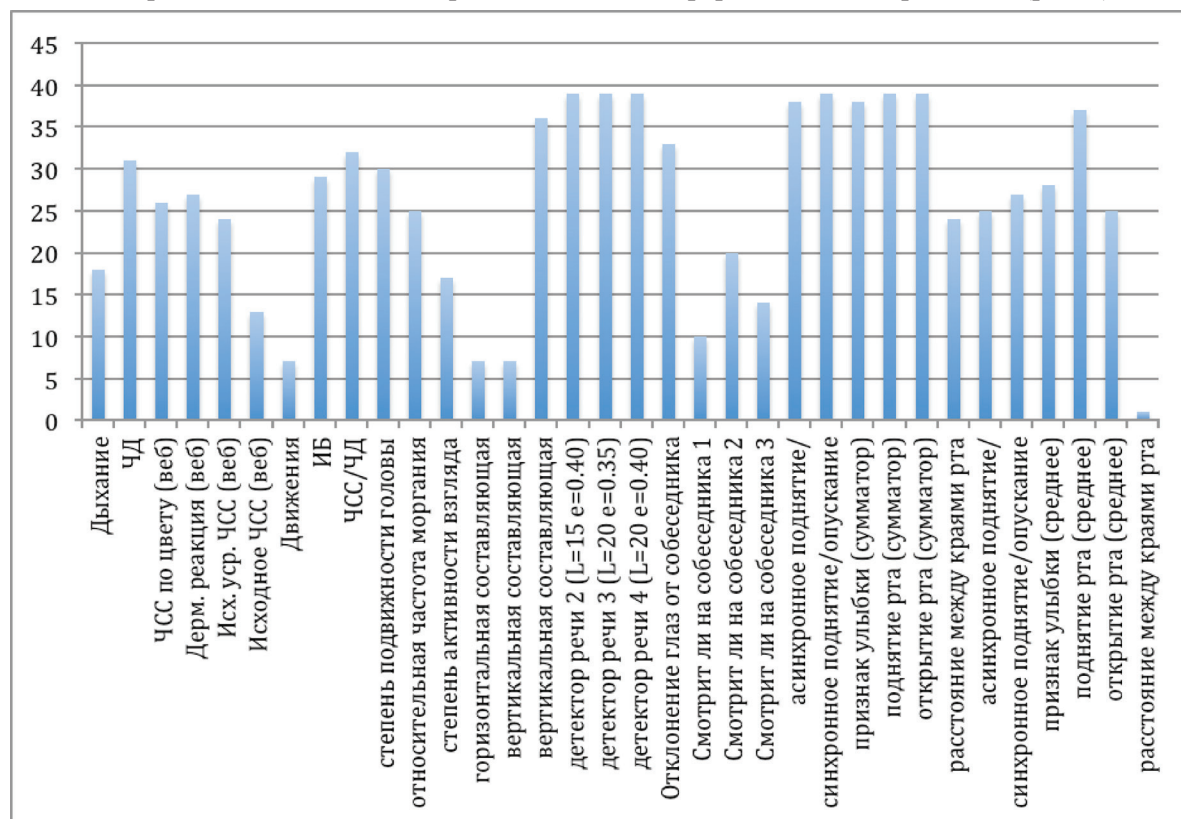


Рис. 3. Анализ степени информативности признаков

Из данной диаграммы видно, что такие признаки как частота дыхания (ЧД), частота сердечных сокращений (ЧСС), дерматическая реакция, индекс напряжения Р. М. Баевского (ИБ), ЧСС/ЧД, степень подвижности головы, вертикальная составляющая, детекторы речи, отклонение глаз от собеседника, асинхронное/синхронное поднятие/опускание бровей, признак улыбки, поднятие рта, открытие рта, поднятие рта (среднее) являются наиболее информативными. А такие признаки как исходное ЧСС, движения, горизонтальная и вертикальная составляющая направления взгляда, смотрит ли на собеседника и расстояние между краями рта практически не дают нам никакой полезной информации. Эта информация может оказаться полезной при оптимизации количества параметров для обработки. На самые информативные признаки можно обратить больше внимания, а неинформативные — убрать. Данная статистика была составлена после обработки базы данных экспериментов. На примерах двух- и четырехкластерного анализа отчетливо видно, что в некоторых моментах все кластеры сходятся в одном месте — это говорит нам о том, что на данном признаке показатели изменяются незначительно [5] – [14].

Далее, для анализа содержимого кластеров и для выявления тем 2–3 (спокойное состояние) и 22–23 (идет трансляция лжи) была написана программа на языке bash, которая выставляет время из двух кластеров (двухкластерный анализ) в хронологическом порядке, подсвечивая его разными цветами. Также на каждом моменте времени подписано, о какой теме идет речь. Из полученных данных видно, что практически все моменты времени, когда испытуемый говорил на темы 2–3 находятся в красном кластере (испытуемый был спокоен), а во время тем 22–23 моменты времени постоянно скачут из красного кластера в зеленый (т.е. испытуемый волнуется) (рис. 4).

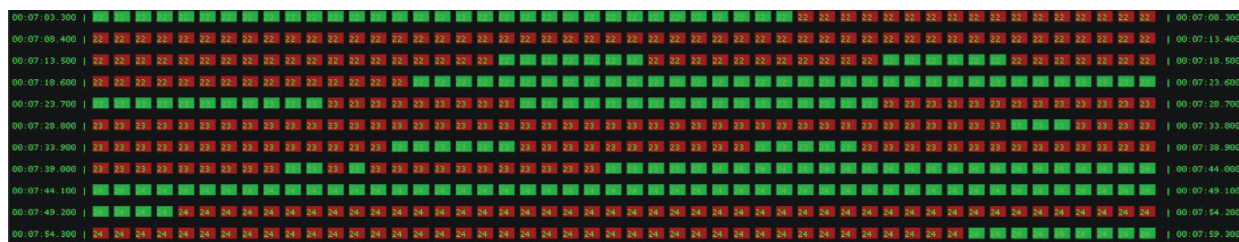


Рис. 4. Пример изображения, отображающего хронологию времени трансляции правды/лжи

Эти данные подтверждает график, полученный в программе Excel (рис. 5).

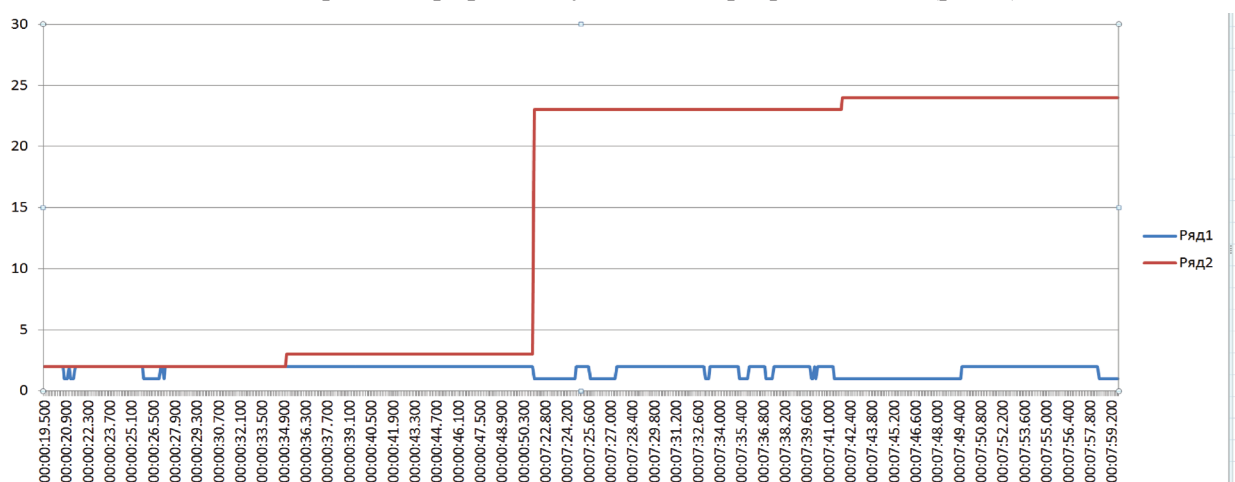


Рис. 5. График хронологии времени трансляции правды/лжи

Красный график — это темы. Здесь были выделены темы 2–3 и 22–23 для лучшей наглядности. Снизу показано время. А синий график — это кластеры: первый и второй. Хорошо видно, что пока испытуемый рассуждает на темы 2 и 3, колебание в кластерах минимально, но когда он переходит к темам 22–23, так же как и в программе, показанной ранее, перепад в кластерах намного заметнее.

Заключение

Из изложенного можно сделать вывод о том, что существует реальная возможность создания цифрового полиграфа на основе видео и аудио данных. Стоит отметить, что в каждом эксперименте испытуемый при трансляции заведомо ложных сведений переживает микростресс, что отражается на его вегетативной нервной системе и позволяет исследователю зафиксировать изменения. Изменения показателей закономерны, следовательно, к ним применимы методы статистического анализа.

С применением метода кластерного анализа исходные данные были разбиты по таксонам, отражающим два (или более, на усмотрение исследователя) состояния испытуемого. Уместно было бы соотносить эти состояния с трансляцией испытуемым заведомо ложных сведений. Также была создана статистика, отражающая информативность каждого отдельно взятого признака. На основе этой статистики можно соотнести информативность признаков между собой.

Учитывая современную возможность быстрой передачи больших массивов данных, коими являются видео и аудио данные, на любые расстояния, появляется реальная возможность в режиме практически реального времени подтверждать при помощи полиграфов истинность получаемой от субъектов информации, в том числе от субъектов, находящихся в рейсах и на удаленных объектах.

Список литературы

1. International Ship and Port Facility Security (ISPS) Code, 2nd edition, 2009. — 272 с.
2. Федеральный закон от 09.02.2007 №16-ФЗ (ред. от 03.02.2014) «О транспортной безопасности». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.garant.ru/12151931/#help> (дата обращения 13.05.2015).
3. Дронов С. В. Многомерный статистический анализ / С. В. Дронов. — Барнаул, 2005. — 213 с.
4. Гитис Л. Х. Статистическая классификация и кластерный анализ / Л. Х. Гитис. — М.: Изд-во Московского государственного горного ун-та, 2003. — 159 с.
5. Артемьев А. Б. Полиграф и права человека / А. Б. Артемьев, М. О. Воробьев // Юридическая мысль. — 2012. — № 2. — С. 13–18.
6. Семенцов В. А. Проверка правдивости показаний на полиграфе / В. А. Семенцов // Российский юридический журнал. — 2011. — № 2. — С. 111–116.
7. Леонтьев К. А. Оценка результатов тестирования на полиграфе методами регрессионного анализа / К. А. Леонтьев, С. Д. Панин, Ю. И. Холодный // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. — 2014. — № 10. — С. 230–243.
8. Гаужаева В. А. Методические основы проведения исследований на полиграфе / В. А. Гаужаева // Теория и практика общественного развития. — 2015. — № 1. — С. 57–60.
9. Савченко Т. Н. Применение методов кластерного анализа для анализа данных психологических исследований / Т. Н. Савченко // Прикладная юридическая психология. — 2008. — № 4. — С. 100–111.
10. Нелипа Д. В. Применение кластерного анализа при проведении системного анализа в политологии / Д. В. Нелипа // Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Філософія. Політологія. — 2012. — № 110. — С. 27–32.
11. Григорьев А. А. Кластерный анализ как инструмент обработки данных при анализе информационных систем / А. А. Григорьев // Известия российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. — 2013. — № 1 (11). — С. 036–048.
12. Dap Louw. Forensic Psychology, In International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition), edited by James D. Wright, Elsevier, Oxford. — 2015. — P. 351–356.
13. Development of the polygraph technique in Japan for detection of deception. Yamamura, Takehiko et al. Forensic Science International. — Vol. 44. — Issue 2. — 257–271.
14. David C. Raskin and John C. Kircher, Chapter 3. — Validity of Polygraph Techniques and Decision Methods, In Credibility Assessment, edited by David C. Raskin and Charles R. Honts John C. Kircher, Academic Press, San Diego. — 2014. — P. 63–129.

УДК 656.212: 004.94

Р. Г. Король,
соиск.;

А. С. Балалаев,
д-р техн. наук, доц.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНАЯ СТАНЦИЯ – МОРСКОЙ ПОРТ» НА ПРИМЕРЕ ВЛАДИВОСТОКСКОГО ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА

THE SIMULATION MODELING SYSTEM «RAILWAY STATION – SEAPORT» VLADIVOSTOK TRANSPORT HUB

В данной работе представлена имитационная модель системы «железнодорожная станция – морской порт» для определения максимальной пропускной способности транспортного узла при заданном техническом оснащении обычных условиях и в условиях неравномерности поступления вагонопотока (при

сгущенном подходе поездов). С целью реализации имитационной модели был произведен анализ технологии переработки экспортного и импортного вагонопотока, поступающего в систему «железнодорожная станция – морской порт», а также описан принцип работы имитационной модели, функциональные элементы моделируемой системы. Исходные данные для модели – статистические данные и вероятностные значения. Разработанная модель является динамической и представляет собой дискретно-событийное имитационное моделирование. Произведена апробация имитационной модели на примере припортовой станции Владивосток и ОАО «Владивостокский морской торговый порт» в рамках Владивостокского транспортного узла. В результате моделирования системы «железнодорожная станция – морской порт» были получены основные показатели работы транспортного узла: объемы переработанного вагонопотока с разбивкой по роду груза, время простоя подвижного состава под технологическими и грузовыми операциями, загрузка станционных путей и путей морского порта, количество принятых и отправленных поездов.

In this work, we developed a simulation model of the system «railway station – seaport» to determine the maximum capacity of the transport node at a given technical equipment transportation hub under existing conditions and under conditions of uneven receipt of wagons (if condensed the approach of trains). To implement the simulation model analysis was made of the technology for processing export and import wagons entering the system «railway station – seaport», and also described the principle of operation of the simulation model, the functional elements of the system being modeled, the input data for the model – statistics and probability values. The developed model is dynamic and is discrete event simulation. Produced approbation of the simulation model on the example of Vladivostok station and «Vladivostok sea trading port» in the framework of Vladivostok transport hub. The result of simulation of the system «railway station – seaport» main indicators of transport hub: the volume of recycled wagons broken down by the nature of the cargo, the time of idle rolling stock under technological and cargo operations, loading station tracks and paths of the sea port, the number of received and sent trains.

Ключевые слова: имитационная модель, система «станция – порт», транспортный узел, взаимодействие железнодорожного и морского транспорта.

Key words: the simulation model, the system «station – port», transport hub, the interaction of rail and sea transport.

ИМИТАЦИОННОЕ моделирование работы системы «железнодорожная станция – морской порт» позволит исследовать процесс переработки вагонопотока на станции и в порту, который реализуется последовательностью следующих операций: прием поездов, перестановка из приемо-отправочного парка в сортировочный, расформирование, подача вагонов на причалы порта, погрузочно-выгрузочные операции с вагонами, уборка вагонов с путей порта, накопление вагонов в сортировочном парке, формирование составов, подготовка их к отправлению в приемо-отправочном парке и отправление со станции. Для выполнения перечисленных технологических операций в системе «станция-порт» имеются функционально-взаимодействующие объекты: входные участки; парк прибытия; сортировочный парк; вытяжные пути; пути порта; парк отправления; выходные участки. Каждое из перечисленных устройств обладает некоторыми параметрами: например, парки станции характеризуется своей емкостью, соответствующей количеству имеющихся путей определенной длины, достаточной для размещения необходимого числа вагонов и т.п. Остальные же устройства характеризуются еще и временем обслуживания поступивших вагонов, т.е. продолжительностью выполнения той или иной операции [1].

Цель создания имитационной модели – установить, соответствуют ли параметры работы железнодорожной станции и порта (перерабатывающая способность, время нахождения вагонов на станции с расчленением по операциям, полная загрузка устройств терминала порта и железнодорожных путей), заданным параметрам в системе – увеличению прибывающего вагонопотока. Результатом моделирования должно стать определение условий, при которых система «станция – порт» не сможет функционировать и перерабатывать поступающий вагонопоток.

Исходными данными для модели являются:

– технические характеристики рассматриваемого транспортного узла (компоновка железнодорожной станции и порта, количество станционных путей в парках, вместимость путей, количество причалов, вместимость грузовых фронтов);

– характеристики прибывающих поездов (количество вагонов в составе, тип подвижного состава, род перевозимого груза);

– временные параметры: осмотр состава по прибытию и отправлению, время на грузовые операции, время на маневровые передвижения (расформирование и формирование составов в сортировочном парке, перестановки состава из сортировочного парка в приемо-отправочный парк) [2].

Для формирования имитационной модели необходимо рассмотреть технологию переработки экспортного и импортного вагонопотока, поступающего в систему «железнодорожная станция – морской порт». В описании технологии моделирования работы транспортного узла рассматриваются операции, которые влияют на работу системы «станция – порт» наиболее существенно (рис. 1).



Рис. 1. Технологическая схема обработки экспортного и импортного вагонопотоков

Поезда, включающие вагоны с экспортным грузом, прибывают на станцию в соответствии с планом формирования поездов и поступают на пути парка приема, где производится осмотр составов в техническом и коммерческом отношении. В сортировочном парке припортовой станции происходит расформирование поездов и формирование групп вагонов (подача) с подборкой их на причалы порта. Вагоны подбираются в соответствии с заявкой порта. По окончании формирования состава, его переставляют на пути порта для таможенного оформления внешнеторговых грузов.

Вагоны с импортным грузопотоком оформляются на путях порта, где производится таможенный досмотр. Далее вагоны переставляются в сортировочный парк под накопление и формирования состава для отправления со станции. Затем следует перестановка в парк отправления, где производится технический и коммерческий осмотр состава, после чего поезд отправляется.

Транспортными единицами системы «станция – порт» являются составы, которые состоят из вагонов [3]. Интенсивность поступления транспортных единиц определяется числом груженых

и порожних вагонов, поступающих на станцию в расформирование за единицу времени. Вагоны описываются следующими параметрами:

- тип вагона;
- род перевозимого груза;
- время нахождения вагона на путях станции в ожидании технологических операций (приемо-отправочный парк, сортировочный парк, пути порта);
- время на погрузку, выгрузку вагона на путях порта.

Имитационная модель позволяет моделировать работу системы «станция – порт» по этапам, т.е. система разбивается на функциональные элементы: приемо-отправочный парк – сортировочный парк – пути порта. На этих этапах поочередно рассматривается состояние транспортно-единицы в моделируемой системе с заданной единицей модельного времени (минуты, часы, сутки) [4].

Действие имитационной модели построено на вводе в систему статистических данных, содержащих временные параметры нахождения различных вагонов с определенными грузами на каждом этапе в системе «станция – порт». Исходные данные содержат следующую информацию [4]:

1. максимальное (минимальное) количество поступающих поездов за сутки;
2. время нахождения вагонов на путях парка приема;
3. время нахождения вагонов в сортировочном парке;
4. время нахождения вагонов на путях порта (согласно специализации причала).

Разработанная модель, после накопления состава поезда, самостоятельно формирует, представляет в парк отправления и отправляет поезд со станции.

В моделируемую систему в качестве вероятностных значений вводятся: время поступления поездов на станцию, количество прибывающих поездов (согласно графику движения поездов и произвольные параметры), время между прибытием поездов (организация сгущенного подхода), количество вагонов с определенным грузом в составе поезда (сборные, контейнерные, маршрутные) [5], [6].

Особенность разработанной модели заключается в том, что она позволяет смоделировать работу припортовой станции в реальных условиях, учесть все временные характеристики нахождения вагонов в системе «станция – порт», технологическое время и сверхнормативный простой вагонов.

Единицей имитационного времени модели являются минуты. Так как нахождение вагона на определенном этапе обработки в течение суток разбивается с точностью до минуты, можно посмотреть работу станции в любой промежуток времени.

Разработанный программный комплекс позволяет смоделировать с определенной долей вероятности работу железнодорожной станции по обслуживанию причалов морского порта в течение нескольких суток.

Программа позволяет вводить исходные данные о количестве путей на грузовом фронте каждого причала в морском порту, обрабатывающих различные грузопотоки. Возможно, смоделировать разные варианты работы системы «станция – порт»: в существующих условиях и в условиях увеличенного вагонопотока.

Рассмотрим имитационное моделирование работы припортовой станции Владивосток, по обслуживанию путей ОАО «Владивостокский морской торговый порт» (ВМТП) и проанализируем полученные результаты [7].

Для инициализации модели используем следующие входные данные:

- сортировочный парк станции Владивосток состоит из 19 путей, различной вместимости;
- ОАО «ВМТП» включает 11 причалов, на каждом причале от 1 до 4 путей, различной вместимости с различной специализацией;
- количество путей в приемо-отправочном парке станции – 4;
- состав поезда – 71 условный вагон.

Рассматриваемый временной период моделирования – 5 суток. Этого периода достаточно для того, чтобы проанализировать работу припортовой станции и порта.

Смоделированы различные варианты работы системы «станция – порт» [8]:

1. Модель работы системы в существующих условиях: на станцию Владивосток прибывает ежедневно четыре поезда.

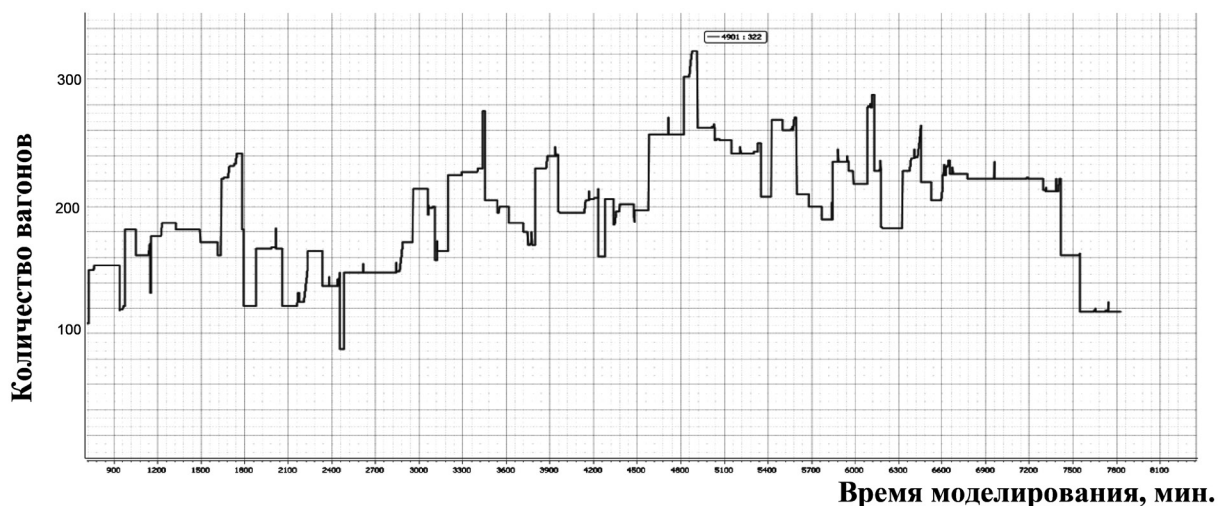


Рис. 2. Графическое представление загрузки сортировочных путей при среднесуточном поступлении четырех поездов на припортовую станцию

Из рис. 2 видно, что станция функционирует в нормальном режиме, максимальный рабочий парк станции составил 320 вагонов к концу третьих суток.

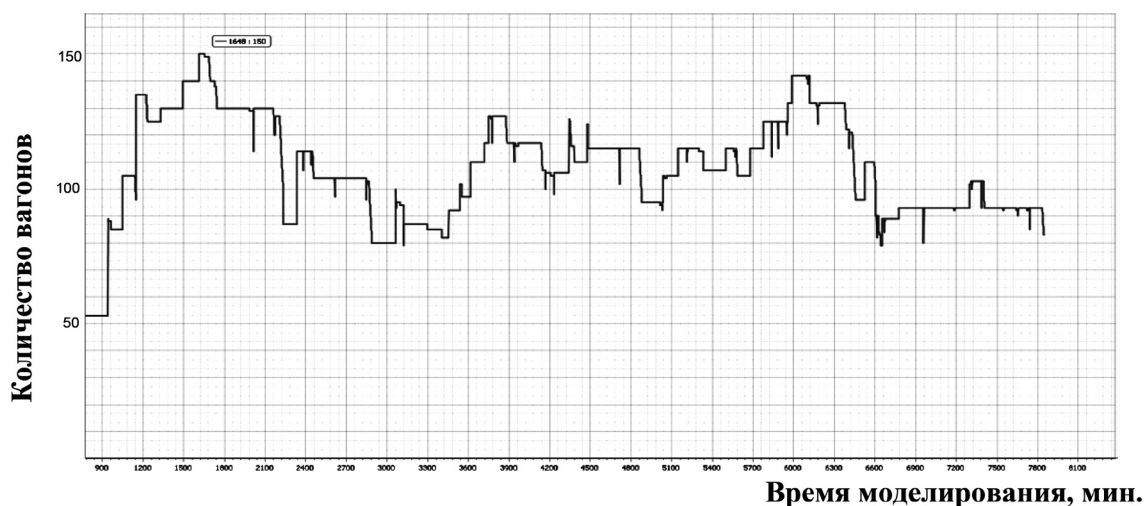


Рис. 3. Графическое представление загрузки путей порта при среднесуточном поступлении четырех поездов на припортовую станцию

Рис. 3 показывает, что пути причалов морского порта загружены практически полностью, порядка 140 – 150 вагонов находятся под грузовыми операциями или в ожидании этих операций.

На основе построенных графиков можно сделать вывод, что у станции есть резерв пропускной способности – при поступлении четырех поездов на станцию в расформирование есть свободные сортировочные пути, есть небольшой резерв путей в порту.

2. Модель работы системы в условиях увеличения прибывающего вагонопотока: на станцию Владивосток каждые сутки прибывает шесть поездов.

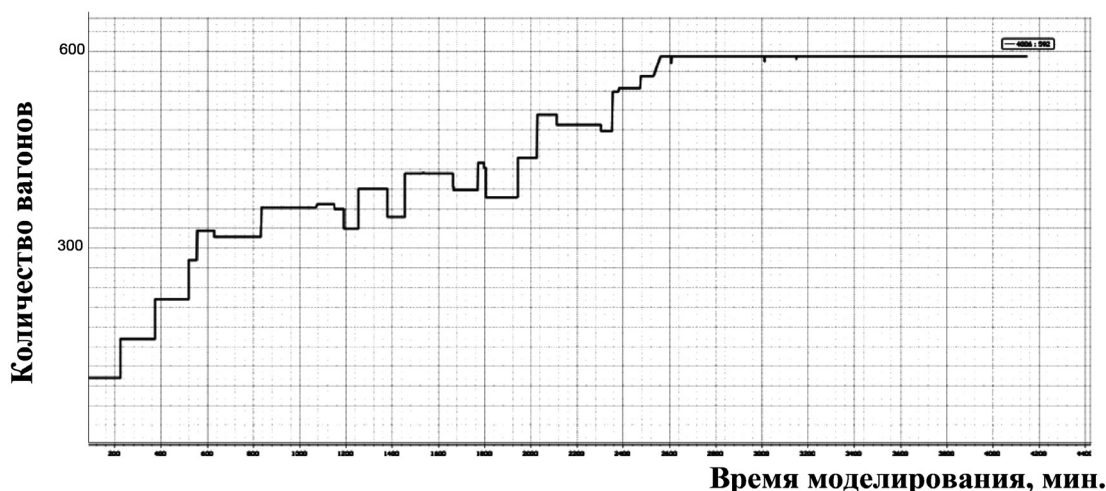


Рис. 4. Графическое представление загрузки сортировочных путей при суточном поступлении шести поездов на припортовую станцию

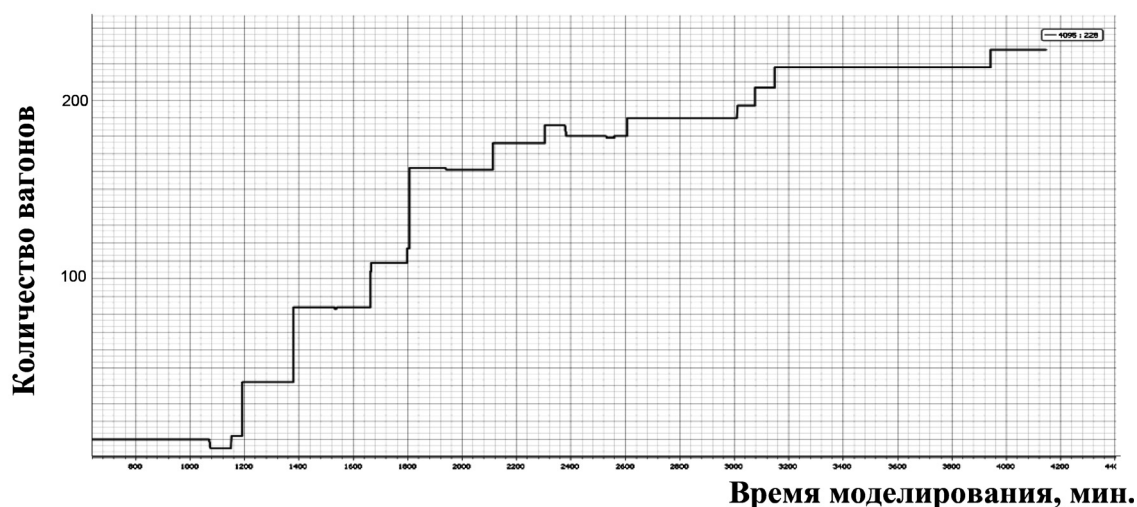


Рис. 5. Графическое представление загрузки путей порта при суточном поступлении шести поездов на припортовую станцию

Из рис. 4 – 5 видно, что станция Владивосток и морской порт не справляются с поступающим вагонопотоком, рабочий парк станции достиг 600 вагонов, станция не может функционировать в нормальном режиме. При поступлении шести поездов в сутки, с учетом времени нахождения вагонов на сортировочных путях в ожидании подачи на пути порта и под грузовыми операциями, система «станция – порт» будет парализована уже на третьи сутки [8].

Разработанная имитационная модель системы «железнодорожная станция – морской порт» может быть использована для рационализации работы существующих транспортных узлов.

Выводы. Функционирование транспортного узла является сложнейшим процессом, описать который без имитационного моделирования практически невозможно [9]. С помощью разработанной имитационной модели системы «железнодорожная станция – морской порт» можно

увидеть «узкие места» в работе припортовой станции по обслуживанию морского порта, а также установить предел вагонопотока, который сможет принять станция.

Из смоделированных графиков видно, что припортовая станция Владивосток в условиях увеличения количества поездов с четырех в настоящее время до шести в перспективе, при существующей технологии работы и времени на выполнение технологических и грузовых операций, не сможет функционировать в нормальном режиме и обслуживать причалы морского порта своевременно. Поэтому необходимо создать тыловой терминал «сухой порт» для обслуживания транспортного узла [10]. Терминал «сухой порт» будет являться альтернативой расширения морского порта и позволит увеличить пропускную способность системы «станция – порт». В этом случае вагонопоток, идущий на припортовую станцию будет замыкаться на станции, обслуживающей «сухой порт», для выполнения различных операций с грузами, а затем этот грузопоток будет поступать на причалы морского порта подобранными группами вагонов под конкретное судно, минуя припортовую станцию транзитом.

В странах Европейского союза, США, Японии и Китае активно ведется строительство терминалов типа «сухой порт», где осуществляется таможенное оформление грузов, накопление судовых партий, сортировка и хранение грузов (контейнеров), оказание услуг клиентам по принципу «одного окна» и т.д. Такого понятия как «брошенные» поезда в припортовых станциях в развитых странах не существует, весь вагонопоток прибывает на тыловой терминал, который имеет достаточную территорию для принятия и складирования всех поступающих грузов.

Определение оптимального транспортного потока для транспортного узла позволит эффективно использовать ресурсы системы «станция – порт» и обеспечить переработку грузопотоков максимального объема. Установление соответствия между мощностью технических устройств припортовой станции и величиной имеющихся или спрогнозированных грузопотоков является условием эффективного функционирования системы «железнодорожная станция – морской порт».

Список литературы

1. Новиков П. А. Имитационный метод динамического согласования (И-МДС) как аппарат оптимизации сложных технологических процессов на транспорте / П. А. Новиков // Транспорт Урала. — 2008. — № 3 (18). — С. 10–12.
2. Козлов П. А. Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов / П. А. Козлов, В. Ю. Пермикин, В. С. Колокольников // Транспорт Урала. — 2013. — № 2 (37). — С. 3–6.
3. Глушков С. В. Построение нечеткой нейросетевой модели информационной системы управления транспортно-логистическим процессом / С. В. Глушков, Н. Г. Левченко, Ю. Ю. Почесуева, Е. М. Коньков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3. — С. 100–112.
4. Король Р. Г. Имитационное моделирование работы припортовой железнодорожной станции с вероятностно-статистическим подходом к изменению параметров поступающего вагонопотока / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Транспорт Урала. — 2014. — № 3 (42). — С. 53–58.
5. Семенов К. М. Планирование обработки грузов в морских портах и терминалах на основе дискретно-событийного имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук, 05.22.19 / К. М. Семенов; [Место защиты: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»]. — Калининград, 2014. — 173 с.
6. Кузнецов А. Л. Имитационная модель в порту Тамань / А. Л. Кузнецов, И. М. Русу, М. Н. Горынцев [и др.] // Морские порты. — 2013. — № 7 (118). — С. 34–38.
7. Король Р. Г. Технология функционирования Владивостокского транспортного узла при наличии мультимодального терминала «сухой порт» / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 92–101.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Король Р. Г. Программа имитационного моделирования работы припортовой железнодорожной станции с вероятностно-статистическим подходом к изменению параметров поступающего вагонопотока / Р. Г. Король, П. В. Даниленко // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2014. — № 2014613827.

9. Балалаев А. С. Методология транспортно-логистического взаимодействия при мультимодальных перевозках: дис. ... д-ра техн. наук, 05.22.19 / А. С. Балалаев; [Место защиты: ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения»]. — М., 2010. — 280 с.

10. Галин А. В. Сухие порты как часть транспортной инфраструктуры. Направления развития / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 87–92.

УДК 004.054

Н. В. Крупенина,
канд. техн. наук, доц.;

Н. Ю. Барышникова,
асп.;

А. Н. Тындыкарь,
асп.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ РАБОТНИКОВ МОРСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

ORGANIZATION OF A DISTRIBUTED SYSTEM BY ELECTRONIC TESTING FOR CONFORMITY ASSESSMENT OF PROFESSIONAL COMPETENCIES BY EMPLOYEES OF MARITIME SPECIALTIES

В статье предложено решение по организации распределенной системы подготовки и проведения электронного тестирования для оценки соответствия профессиональным компетенциям с целью обеспечения профессиональной подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров по морским специальностям. Основной задачей программного комплекса является поддержка и использование метода управления персоналом по компетенциям, что значительно повышает оперативность и достоверность определения навыков работника или кандидата на соответствующую должность. Для объективной и независимой характеристики результатов прохождения теста разработан и внедрен алгоритм расчета оценки знаний и их соответствия требованиям профилей компетенций персонала в области морских специальностей. Главной задачей данного механизма является: определение фактического уровня развития умений работника или кандидата на должность и его сравнение с требуемым уровнем. Представленный в статье программный комплекс впервые предполагает обеспечить комплексное решение задач в области организации подготовки морских специалистов для всех направлений производственной деятельности.

The article suggested a decision by organization of a distributed system of electronic testing for conformity assessment of professional competencies in order to provide training, further training and retraining of personnel for maritime professions. The main task of software system is the support and the using of the personnel management competency, which greatly improves the efficiency and accuracy of allegiance to determine the skills of an employee or a candidate for the post. For an objective and independent test results to specifications developed and implemented the algorithm of calculation of estimation of knowledges and their compliance with the requirements of staff competencies profile in marine specialties. The main task of this mechanism is defemition of the actual level of development of the skills of the employee or candidate and compares it to the required level. The software for

the first time in the article implies a complex solution of tasks in the field of training of specialists for all areas of industrial activity.

*Ключевые слова: тестовая система, тестирование, морские специальности, компетенции, обучение.
Key words: test system, testing, maritime specialties, competencies, education.*

Введение

Подготовка новых высококвалифицированных специалистов, а также организация мероприятий по повышению квалификации и переподготовке уже имеющихся кадров в области морских специальностей является актуальной в течение уже многих лет [1] – [4]. Одним из возможных вариантов упрощения решения данной задачи является разработка специализированных тестов для оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей.

В настоящее время для решения кадрового вопроса активно внедряются и используются информационные технологии, предоставляющие новые возможности по проведению электронного тестирования для объективной оценки знаний. Также, учитывая тот факт, что обычно офисы фирм территориально удалены друг от друга, требуется организация единого программного комплекса для совместной работы. Очевидно, что актуальной становится задача создания распределенной системы подготовки и проведения тестирования [5], которая могла бы обеспечить профессиональную подготовку, повышение квалификации и переподготовку кадров. В рамках данной разработки впервые предлагается обеспечить комплексное решение задач в области организации подготовки специалистов для всех направлений производственной морской деятельности.

Организация тестовой системы

Программный комплекс должен поддерживать и реализовать метод управления персоналом по компетенциям — совокупностям профессиональных навыков работника или кандидата, необходимых для решения поставленных задач в рамках должности, что значительно повышает эффективность следующих процессов управления кадрами [6]:

- организация отбора и найма персонала;
- управление резервом кадров;
- управление аттестацией персонала;
- организация обучения и развития персонала;
- работа с вузами, молодыми специалистами и т.д.

Каталог компетенций представляет собой структурированное описание всех компетенций, хранящихся в базе данных и сгруппированных в три раздела: профессиональные, управленческие и лично-деловые. Описание компетенции включает название компетенции, определение компетенции, уровни развития компетенции, индикаторы уровней развития компетенций. Каталог компетенций подвергается постоянному обновлению, тем самым обеспечивается его поддержка в актуальном состоянии. Также он позволяет отследить хронологическую последовательность прохождений тестирования персоналом и претендентами.

Главной целью проведения оценки персонала по компетенциям и ведения каталога компетенций, является определение фактического уровня развития навыков в конкретной должности работника или кандидата и его соответствия профилю компетенции. Фактический уровень определяется на основе анализа результатов тестирования.

Следует различать требуемый уровень развития компетенции и фактический уровень развития компетенции. Требуемый уровень определяется профилем компетенций, разработанным для соответствующей должности, в то время как фактический – это уровень, который подтверждает компетентность работника или кандидата при проведении оценки.

В качестве критерия фактического уровня развития компетенции принимается уровень равный 0,5 — это означает, что, если компетентность работника или кандидата подтверждена менее

чем половиной индикаторов данного уровня, то фактическим уровнем развития компетенции считается более низкий уровень.

Возможны следующие методы проведения оценки:

- интервью по компетенциям — структурированное интервью, содержание которого направлено на определение фактического уровня развития компетенций работника или кандидата;
- центр оценки — моделирование типичных ситуаций, по поведению в которых работник или кандидат оценивается экспертами;
- оценка «360 градусов» — анкетирование персонала из непосредственного окружения работника или кандидата и вынесение оценки по его итогам;
- структурированный опросник — перечень вопросов или утверждений, направленных на оценку компетенции;
- тест или кейс — устные или письменные задания и вопросы, направленные на оценку компетенции работника или кандидата.

В разработанной в качестве системы оценки используется метод проведения тестирования.

Соответствие уровня развития компетенций профилю компетенций оценивается по следующим показателям: C_k — соответствие отдельной компетенции работника или кандидата требуемому уровню развития; $C_{гк}$ — соответствие работника или кандидата профилю по группе компетенций; $C_{пк}$ — общее соответствие профиля компетенций работника или кандидата профилю компетенций должности.

Оценка C_k является точечной, определяет уровень развития отдельной компетенции профиля и вычисляется по формуле

$$C_k = Y_{\text{факт}} - Y_{\text{треб}} \quad (1)$$

где $Y_{\text{факт}}$ — фактический уровень развития компетенции; $Y_{\text{треб}}$ — требуемый уровень развития компетенции.

Показатели $Y_{\text{факт}}$ и $Y_{\text{треб}}$ выражаются в баллах от 0 до 5. Правила определения показателей $Y_{\text{факт}}$ и $Y_{\text{треб}}$ формулируются следующим образом:

- компетенция не развита — 0 баллов;
- уровень развития компетенции «уровень осведомлённости» — 1 балл;
- уровень развития компетенции «уровень знания» — 2 балла;
- уровень развития компетенции «уровень опыта» — 3 балла;
- уровень развития компетенции «уровень мастерства» — 4 балла;
- уровень развития компетенции «экспертный уровень» — 5 баллов.

Отрицательное значение показателя C_k означает, что фактический уровень развития компетенции ниже требуемого уровня, значение $C_k = 0$ — фактический уровень развития компетенции соответствует требуемому уровню, положительное значение C_k — фактический уровень развития компетенции превышает требуемый уровень.

Показатель $C_{гк}$ — это интегральная оценка, которая показывает соответствие фактических уровней развития компетенций работника или кандидата, профилю компетенций занимаемой должности по группам профессиональных, управленческих и личностно-деловых компетенций. При этом $C_{гк}$ рассчитывается отдельно для каждой из перечисленных групп компетенций.

В результате оценки показатель $C_{гк}$ может принимать одно из трёх значений:

- «не соответствует профилю компетенций по данной группе»;
- «превышает профиль компетенций по данной группе»;
- «соответствует профилю компетенций по данной группе».

Значение «не соответствует профилю компетенций по данной группе» присваивается в двух случаях:

- в группе имеются две или более компетенции, фактический уровень развития которых на два уровня ниже требуемого уровня;

– доля компетенций в группе, уровень развития которых ниже требуемого уровня, составляет 20 % или более.

Значение «превышает профиль компетенций по данной группе» присваивается в случае, если доля компетенций в группе, уровень развития которых выше требуемого уровня, составляет 20 % или более. В остальных случаях показатель приобретает значение «соответствует профилю компетенций по данной группе».

Показатель $C_{пк}$ определяет в процентном отношении общее соответствие профилю должности, включающему профили компетенций по всем трём группам.

Окончательная оценка вычисляется по формуле

$$C_{пк} = \frac{\sum_{j=1}^m Y_{факт} \cdot 100}{\sum_{j=1}^m Y_{треб} \cdot 100}, \quad (2)$$

где j — порядковый номер компетенции в профиле; m — общее количество компетенций в профиле компетенций.

В используемой системе оценки показатели C_k , $C_{гк}$ и $C_{пк}$ вычисляются для профилей профессиональных компетенций.

Оценка на соответствие квалификационным требованиям выполняется в следующем порядке.

1. По наименованию должности, определяется перечень документов, которые должен иметь работник или кандидат, претендующий на данную должность. В интерактивном режиме последовательно реализуются следующие процедуры:

- верификация и валидация предъявленных работником или кандидатом квалификационных документов;
- оценка достаточности их по составу для соответствия данной должности.

2. Результаты выполнения каждой процедуры фиксируются в протоколе. По этим данным выносится общая оценка о соответствии или несоответствии работника или кандидата данной должности по квалификационным требованиям.

Оценка «соответствует квалификационным требованиям для данной должности» выносится при одновременном выполнении двух условий:

- наличие у работника или кандидата подлинных и действующих на необходимый период времени квалификационных документов;
- состав документов соответствует перечню, установленному для данной должности.

В случае нарушения хотя бы одного из двух указанных условий выносится оценка: «не соответствует квалификационным требованиям для данной должности».

3. При положительной оценке на соответствие квалификационным требованиям, проводится оценка фактического уровня развития компетенций, которая включает:

- тестирование;
- оценку результатов тестирования;
- представление результатов для принятия решения.

Процедура тестирования заключается в выборе работником или кандидатом правильного, по его мнению, ответа из списка предложенных вариантов ответов на поставленный вопрос. Количество тестовых вопросов зависит от профиля компетенций, соответствующего должности. Профиль компетенции включает набор ключевых профессиональных компетенций и уровень их развития. В список тестовых вопросов включаются ключевые для должности профессиональные компетенции. Для руководителей установлено фиксированное количество ключевых профессиональных компетенций — 11, для специалистов — 9.

Уровень развития каждой из компетенций определяется перечнем основных задач и функций по должности. Каждый уровень развития компетенций содержит определенное количество

индикаторов. Список тестовых вопросов для каждого индикатора содержит группы из пяти вопросов. Каждому вопросу соответствуют три варианта ответа, правильным из которых является только один.

Вопросы для тестирования по отдельным компетенциям предъявляются последовательно в порядке возрастания уровня развития компетенций: сначала тестируются индикаторы «уровня осведомленности», затем — индикаторы «уровня знания» и т. д., вплоть до «экспертного уровня». Переход от тестирования индикаторов нижнего уровня к следующему, более высокому уровню, разрешается только в том случае, если кандидат ответил правильно более чем на 50 % вопросов. В случае если количество правильных ответов на данном уровне оказалось менее 50 %, то тестирование по этой компетенции завершается и фактическим уровнем развития компетенции считается предыдущий уровень.

При тестировании любого индикатора уровня развития из пяти относящихся к нему вопросов, случайным образом выбирается только один. Таким образом, каждый индикатор уровня развития тестируется одним вопросом, что сводит к незначительной величине (0,04) вероятность повторения одного и того же вопроса, относящегося к одному индикатору, для различных сеансов тестирования.

При подготовке тестовых вопросов с вариантами ответов использовались Государственные образовательные стандарты высшего и среднего специального образования, а также нормативные международные и отечественные документы и учебники, одобренные учебно-методическим объединением в области водного транспорта.

По окончании прохождения тестирования пользователем по всем компетенциям профиля система автоматически определяет показатели оценки C_k , $C_{гк}$ и $C_{пк}$. Осуществляется определение фактического уровня развития компетенции, а требуемый уровень рассчитывается по формуле (1). После вычисления показателей C_k по формуле (2) определяются показатели $C_{гк}$ и $C_{пк}$. Численные значения показателей C_k , $C_{гк}$ и $C_{пк}$ используются для принятия решения в отношении работника или кандидата по результатам прохождения тестирования.

Для реализации программного комплекса по созданию распределенной системы подготовки и проведения тестирования в качестве программного продукта была выбрана платформа «1С: Предприятие 8», разработка фирмы «1С», организующая работу пользователя через удаленное интернет-соединение с помощью веб-браузера посредством механизма управляемых форм. Наличие удаленного доступа позволяет говорить о кросс-платформенности и независимости пользовательской среды от внешних факторов, таких как программное обеспечение рабочей станции (например, разные операционные системы, разные браузеры) и аппаратное обеспечение (использование тестовой системы возможно, в том числе, и с мобильных устройств).

В качестве связующего звена интернет-соединения был выбран сервис «1С: Линк», который позволяет пользователям прикладных решений фирмы «1С» самостоятельно организовать безопасный доступ через Интернет к приложениям «1С» в офисе или дома — информационные базы хранятся на компьютерах фирмы в головном офисе.

За основу прикладного решения была выбрана типовая конфигурация разработанная фирмой «1С» — «1С: Электронное обучение. Экзаменатор» [7], адаптированная для использования в целях оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей профилям компетенций.

Вся совокупность используемых данных условно по функциональным особенностям должна быть разделена на следующие подсистемы [8]:

- администрирование;
- управление каталогом компетенций;
- управление процессом тестирования;
- тестирование.

Учитывая различный уровень подготовки пользователей, работающих с тестовой системой, а также наличие различного программного и аппаратного обеспечения, требуется внедрение простого и универсального механизма работы, обладающего гибким и удобным интерфейсом [9].

Для решения данной задачи логичным и удобным является использование механизма бизнес-процессов – устойчивых последовательностей действий сотрудников организации. Автоматизация таких последовательностей упорядочивает работу и значительно ускоряет выполнение конечной задачи. Каждый бизнес-процесс по мере прохождения этапов создает задачи, адресованные определенным пользователям, при этом документы назначаются ролям, а не конкретным исполнителям. В связи с этим стандартная конфигурация «1С: Электронное обучение. Экзаменатор» была доработана и дополнена задачами и бизнес-процессами «Организация тестирования», «Тестирование» и «Апелляция», организующими корректную последовательность выполнения операций в ходе процесса тестирования.

Система обеспечивает обработку результатов тестирований с целью их предоставления в форме, удобной и доступной для понимания пользователя. Такой формой служат отчеты «Прохождение электронных ресурсов», «Оценка соответствия должностным компетенциям», «Мероприятия» и «Оценка соответствия должностным компетенциям», выводящие фактические данные по результатам прохождения тестов как для участников тестирования, так и для организаторов тестирования.

Кроме того, своевременное оперативное проведение всех документов прикладного решения позволяет получать актуальные отчеты на конкретный момент времени, в которых представлена степень готовности соискателей.

Выводы

Главной особенностью представленной распределенной системы подготовки и проведения тестирования является тот факт, что, в отличие от традиционных систем, используется механизм организации и проведения тестирования работников и кандидатов на основе использования метода управления персоналом по компетенциям для морских специальностей. Данный подход значительно повышает оперативность и достоверность определения навыков соискателей на соответствующую должность. Также метод управления персоналом по компетенциям неразрывно связан с улучшениями показателей условий труда, что, в свою очередь, является немаловажным фактом для своевременного развития всех направлений производственной морской деятельности [10], [11].

Таким образом, представленный метод организации профессиональной подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров по морским специальностям позволяет производить своевременный анализ и определение приоритетных для организаций должностей и получать полное представление о контингенте работников организации.

Список литературы

1. Кузьмин А. А. Новый вектор профессионального транспортного образования / А. А. Кузьмин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 55–64.
2. Павловский И. В. Политика национальных интересов России: вектор развития современной России. / И. В. Павловский. — М.: Зебра Е, 2008. — 446 с.
3. 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.
4. Антонова О. Д. Разработка морских и шельфовых месторождений нефти и газа / О. Д. Антонова, Г. В. Лебедев, Г. Е. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 202–214.

5. *Барышникова Н. Ю.* Организация распределенной тестовой системы оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей / Н. Ю. Барышникова, А. Н. Егоров, Н. В. Крупенина [и др.] // Новые информационные технологии в образовании: сб. науч. тр. XVI междунар. науч.-практ. конференции «Новые информационные технологии в образовании» (Применение технологий «1С» для формирования инновационной среды образования и бизнеса), 3–4 февраля 2015 г. — Ч. 1. — М.: ООО «1С-Паблишинг», 2015. — 643 с.

6. *Барышникова Н. Ю.* Распределенная тестовая система оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей / Н. Ю. Барышникова, Л. Н. Тындыкар; отв. ред. С. В. Мульганов // ИТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА: материалы III науч.-исслед. конференции студентов и аспирантов факультета информационных технологий 19 декабря 2014 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 168 с.

7. Описание прикладного решения «1С: Электронное обучение. Экзаменатор». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.v8.1c.ru/elo/exam> (дата обращения — 15.05.2015).

8. *Афонин А. Б.* Распределенная тестовая система оценки профессиональных компетенций работников морских специальностей / А. Б. Афонин, Н. Ю. Барышникова, А. Н. Егоров [и др.] // Материалы XIV Санкт-Петербургской междунар. конференции «Региональная информатика (РИ-2014)», Санкт-Петербург, 29–31 октября 2014 г. — СПб.: СПОИСУ, 2014. — 637 с.

9. *Фомина И. К.* Решение проблем, связанных со сложной системотехнической структурой предметных областей при интеллектуальном анализе данных / И. К. Фомина // Журнал университета водных коммуникаций. — 2009. — № 2. — С. 180а–184.

10. *Решняк В. И.* Профессиональная деятельность работников флота в условиях хронофизиологической адаптации / В. И. Решняк, А. Г. Щуров, О. В. Витязева // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 20–24.

11. *Стрелкова О. В.* Психология профессиональной деятельности моряков. / О. В. Стрелкова. — Калининград: БГА РФ, 2005. — 135 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексеева Екатерина Геннадьевна

Аспирант

Научный руководитель: Лаврентьева

Елена Александровна, доктор экономических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

ket-331@yandex.ru

Андреев Александр Алексеевич

Капитан

ОАО Совкомфлот

captanandreev@mail.ru

Андреева Марина Юрьевна

Кандидат экономических наук, доцент

НОУ «МФПУ «Синергия»

marinand@yandex.ru

Анненков Леонид Владимирович

Аспирант

Научный руководитель: Сухотерин

Михаил Васильевич, доктор технических наук, профессор,

kaf_tm@gumrf.ru

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

annenkov89@mail.ru

Ахундова Гюльшан Агасаф

Ассистент

Научный руководитель: Нагиев Фаик Бахман оглы,

доктор физико-математических наук, профессор,

nagiyevfaik@gmail.com

Азербайджанская Государственная

Морская Академия (АГМА)

gulakhundova@gmail.com

Балалаев Александр Сергеевич

Доктор технических наук, доцент

ДВГУПС

bas51@mail.ru

Барщевский Евгений Георгиевич

Кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

Evgeny_bar@mail.ru

Барышникова Надежда Юрьевна

Ассистент, аспирант

Научный руководитель: Марлей

Владимир Евгеньевич, доктор технических наук, профессор,

marleyve@gumrf.ru, vmarley@yandex.ru

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

baryshnikova.n.yu@gmail.com

Безпальчук Сергей Николаевич

Инженер

ФГАОУ ВО «СПбПУ»

ua1aes@mail.ru

Безюков Олег Константинович

Доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

Okb-nayka@yandex.ru

Белецкий Евгений Николаевич

Кандидат технических наук,

главный технолог

ОАО «Концерн «НПО» Аврора»

BeletskiyEN@avtora.spb.ru

Богданов Роман Борисович

Кандидат биологических наук

ОАО «Северное морское пароходство»,

г. Архангельск

alek912@yandex.ru

Бородулина Светлана Анатольевна

Доктор экономических наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный

экономический университет

ptiter00000@mail.ru

Вепринская Тамара Александровна

Кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

vta46@bk.ru

Волков Роман Викторович

Аспирант

Научный руководитель: Каретников

Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

romvolvik@gmail.com

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

Давыденко Александр Александрович

Кандидат экономических наук,

руководитель Федерального агентства морского и речного транспорта

a.v.kirichenko@mail.ru

Дерябин Виктор Владимирович

Кандидат технических наук, доцент
Арктический морской институт имени
В. И. Воронина – филиал
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
gmavitder@mail.ru

Дорошенко Надежда Ивановна

Аспирант
Научный руководитель: Белов
Даниил Михайлович, доктор географических наук,
профессор,
olt_prts@inbox.ru
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
132620@mail.ru

Живлюк Григорий Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
app.polab@inbox.ru

Жуков Владимир Анатольевич

Доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
gukovv@rambler.ru

Зайнуллин Руслан Ринатович

Соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
zaynullin@eds-marine.ru

Иванченко Александр Андреевич

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
prof_ivanchenko@mail.ru

Игнатов Дмитрий Иванович

Аспирант
Научный руководитель: Приходько Валентин
Макарович, кандидат технических наук, профессор,
prihodki-3@yandex.ru
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
demonus25@mail.ru

Изотов Олег Альбертович

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
iztv65@rambler.ru

Каретников Владимир Владимирович

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
kaf_tss@gumrf.ru

Кириченко Александр Викторович

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
a.v.kirichenko@mail.ru

Кирсанов Михаил Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор
НИУ МЭИ
C216@Ya.ru

Киселевич Геннадий Валерьевич

Аспирант
Научный руководитель: Сикарев
Игорь Александрович, доктор технических наук,
доцент,
sikarev@yandex.ru
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
romvolvik@gmail.com

Колосков Евгений Николаевич

Аспирант
Научный руководитель: Фирсов
Юрий Георгиевич, кандидат технических наук,
доцент,
gidrograph@mail.ru
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
evgenklkv@mail.ru

Король Роман Григорьевич

Старший преподаватель
ДВГУПС
kingkhv27@mail.ru

Крупенина Наталия Викторовна

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
nvkrup@yandex.ru

Крюков Никита Дмитриевич

Аспирант
Научный руководитель: Шматков
Владимир Антонович, доктор технических наук,
профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
k.n.d@mail.ru

Кубасов Роман Викторович

Кандидат биологических наук, доцент
Северный государственный медицинский
университет (г. Архангельск)
romanas2001@gmail.com

Кузнецов Александр Львович

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
thunder1950@yandex.ru

Кузнецов Владимир Николаевич

Аспирант

Научный руководитель: Нырков

Анатолий Павлович, доктор технических наук,
профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

ponen@yandex.ru

Кулаченков Сергей Александрович

Аспирант

Научный руководитель: Петров

Владимир Маркович, доктор технических наук,
профессор

ФГАОУ ВО «СПбПУ»

serg643@rambler.ru

Лупачев Валерий Валентинович

Доктор медицинских наук, профессор

Северный государственный медицинский

университет (г. Архангельск),

Северный (арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова (г. Архангельск)

valerii-lvv@mail.ru

Майоров Николай Николаевич

Кандидат технических наук, доцент

ГУАП

sciencesuai@yandex.ru

Матвеев Алексей Александрович

Аспирант

Научный руководитель: Нырков

Анатолий Павлович, доктор технических наук,
профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

lesha.matweew@yandex.ru

Нырков Анатолий Павлович

Доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

kaf.koib@gmail.com

Панасенко Зоя Александровна

Инженер

jeu_7@mail.ru

Пантина Татьяна Алексеевна

Доктор экономических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

PantinaTA@gumrf.ru

Пантюхин Игорь Сергеевич

Аспирант

Научный руководитель: Зикратов

Игорь Алексеевич, доктор технических наук,
zikratov@cit.ifmo.ru

Университет ИТМО

zevall@ya.ru

Петров Александр Павлович

Кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

app.polab@inbox.ru

Пластинин Андрей Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «Волжская государственная

академия водного транспорта»

plastininae@yandex.ru

Приходько Валентин Макарович

Кандидат технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

prihodki-3@yandex.ru

Приходько Ирина Валентиновна

Аспирант

Научный руководитель: Поваров

Герман Васильевич, доктор экономических наук,
профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

prihodko-ira@yandex.ru

Сабуров Сергей Викторович

Аспирант

Научный руководитель: Сахаров

Владимир Васильевич, доктор технических наук,
профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

chertkov51@mail.ru

Сахаров Владимир Васильевич

Доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

saharovVV@spbuwc.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

Maxwell_8-8@mail.ru

Тимофеев Виталий Никифорович

Кандидат технических наук, доцент

Чувашский государственный

университет имени И. Н. Ульянова

timofeev.vitaly2010@yandex.ru

Тындыкарь Любовь Николаевна

Ассистент, аспирант

Научный руководитель: Марлей

Владимир Евгеньевич, доктор технических наук,
профессор,

marleyve@gumrf.ru, vmarley@yandex.ru

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

tyndykar@bk.ru

Фетисов Владимир Андреевич

Доктор технических наук, профессор

ГУАП

Fet1@aanet.ru

Фирсов Юрий Георгиевич

Кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

gidrograph@mail.ru

Чертков Александр Александрович

Кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

chertkov51@mail.ru

Шматков Владимир Антонович

Доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

shmatkov42@mail.ru

Юрин Игорь Валентинович

Кандидат военных наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

9402015@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи подготавливаются в текстовом редакторе Microsoft Word 2003 и представляются в печатном виде на одной стороне страницы формата А4 и в электронном — на любом носителе или по электронной почте. В тексте статьи устанавливается автоматическая расстановка переносов. Размер полей текста устанавливается равным 25 мм со всех сторон. Ориентация страниц — книжная. Текст набирается шрифтом Times New Roman.

Оформление статьи должно соответствовать следующим требованиям:

- УДК набираются прописными буквами полужирным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по левому краю;
- инициалы и фамилия автора (авторов) набираются строчными буквами полужирным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по правому краю. Ученая степень и ученое звание авторов (при наличии) — строчными буквами размером 11 pt с выравниванием по правому краю;
- полное название организации набирается строчными буквами обычным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по правому краю;
- название статьи на русском и английском языках набирается прописными буквами полужирным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по центру;
- аннотация и ключевые слова на русском и английском языках набираются строчными буквами курсивом размером 10 pt с выравниванием по ширине (аннотация 100–150 слов на русском языке, перевод на англ. языке, допускается расширенная аннотация на англ. языке (до 500 слов) или графическая аннотация);
- основной текст набирается строчными буквами размером 11 pt с выравниванием по ширине. Отступ первой строки — 1,25 см;
- статья обязательно должна содержать список используемой литературы (не менее 10–15 наименований по ГОСТ Р 7.0.5-2008), ссылки нумеруются в тексте статьи в порядке увеличения, рекомендуется использовать релевантные источники, ссылки на труднодоступные источники информации отклоняются, не рекомендуется использовать ссылки на литературу старше 10 лет;
- межстрочный интервал — одинарный;
- таблицы набираются в текстовом редакторе Microsoft Word. Над таблицей указывается ее номер, затем название;
- номер и название рисунков пишутся под ними;
- формулы набираются с помощью Math Type 6.0.

С требованиями по оформлению статей можно ознакомиться на официальном сайте журнала <http://journal.gumrf.ru>. На сайте также представлены полнотекстовые версии Вестника. Авторские экземпляры распространяются по подписке.

Направив в редакцию рукопись, автор подтверждает свое согласие на публикацию рукописи в открытой печати и на размещение в сети интернет в открытом доступе. В журнал автором направляются следующие материалы: текст статьи, анкета автора, одна внешняя рецензия, заверенная печатью организации (дополнительно для аспирантов — отзыв научного руководителя) и экспертное заключение. Все поступившие материалы проходят проверку в системе, реализующей технологию проверки текстовых документов на наличие заимствований «Антиплагиат». Редакция придерживается Кодекса этики научных публикаций (<http://publicet.org/code/>) и проявляет нетерпимость к плагиату.

Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы. Число авторов статьи — не более трех человек.

Предоставленные материалы первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются на рецензирование. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ. При отклонении материалов из-за нарушения требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются. Авторы статей несут полную ответственность за предоставленные материалы, в том числе за соблюдение правил публикации материалов в открытой печати.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов осуществляется бесплатно.

Электронный адрес редакции: journal@gumrf.ru

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Выпуск 3 (31)

2015 год

Выпускающие редакторы
Н. А. Карамзина, Т. В. Середова
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*
Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 19.06.15. Формат 60х90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 28,5. Тираж 500 экз. Заказ № 370/2015

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7