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 4 (32)

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2015

ББК 95

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — Вып. 4 (32). — 246 с.

ISSN 2309-5180

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

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

Статьи публикуются на русском и английском языках.

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

Статьи рецензируются независимыми экспертами.

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

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

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

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

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



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

Дерябин В. В., Сазонов А. Е. Нейро-нечёткая модель счисления пути судна 7

Агарков С. А. Анализ результатов моделирования движения танкера в условиях ветровых нагрузок 16

Малыхин М. О., Кириченко А. В. Обоснование исходных данных при моделировании вывоза контейнеров из порта на тыловой терминал с применением технологии «блок-трейн» 22

Крюков Н.Д. Рекомендации для судов при плавании в условиях тропических штормов Северной Атлантики 31

Ершов А. А., Хухарев Д. А. Определение условий безопасного захода судна в порт 38

Бондаренко А. В., Некрасов В. А., Ястреба А. П. Методика выбора оптимального состава буксирного обеспечения порта 43

Мойсеенко С. С. Проектирование системы управления рисками в мореплавании и океаническом рыболовстве 53

Курников А. С., Мизгирев Д. С., Черепкова Е. А. Расчет гидродинамического кавитатора с тороидальной камерой смешения 60

Наумов В. С., Нестерова О. С. Оценка вероятности загрязнения экологически чувствительных зон внутренних водных путей нефтью и нефтепродуктами 66

Белов Л. Б. Метод ABC (Activity Based Costing) в распределении операционных затрат комплексного транспортного процесса 74

Степанов А. Л. Носкова Е. В. Кадровое обеспечение устойчивого развития морской транспортной инфраструктуры 83

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 90

Афонин А. Б., Лутков С. А., Тезиков А. Л. Особенности построения изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа 90

Кожухов И. В., Колосков Е. Н., Фирсов Ю. Г. Электронная инженерная гидрография и перспективы получения новых данных по морфологии и геоэкологии арктических морей 95

Тимофеева О. А. Анализ численных методов расчета течения жидкости в водопропускных сооружениях 104

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 109

Карклина Т. О., Павлов А. В., Чистов В. Б. Повышение точности измерения остаточного перегиба корпуса судна 109

Голоскоков Д. П. Расчет плоских перекрытий в системах символьных вычислений 119

Нгуен Н., Рубан А. Р. Влияние дефектов сварных швов на механические свойства корпусной стали, определяемые при динамическом нагружении 126

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 131

Жуков В. А. Перспективы совершенствования систем охлаждения судовых дизелей 131

выпуск 4(32) 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 редколлегии:

О. К. Безюков, д.т.н., проф.
В. В. Веселков, д.т.н., проф.
П. А. Гарибин, д.т.н., проф.
Д. П. Голоскоков, д.т.н., проф.
Б. П. Ивченко, д.т.н., проф.
Ю. М. Искандеров, д.т.н., проф.
О. Г. Каратаев, д.т.н., проф.
А. В. Кириченко, д.т.н., проф.
М. А. Колосов, д.т.н., проф.
Е. А. Королева, д.э.н., проф.
И. И. Костылев, д.т.н., проф.
Е. А. Лаврентьева, д.э.н., проф.
А. Ю. Ластовцев, к.т.н., проф.
С. Б. Лебедев, д.э.н., проф.
В. А. Логиновский, д.т.н., проф.
Г. В. Макаров, д.т.н., проф.
В. Е. Марлей, д.т.н., проф.
А. М. Никитин, д.т.н., проф.
А. П.Нырков, д.т.н., проф.
Л. И. Погодаев, д.т.н., проф.
Н. В. Растрыгин, 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.

Боровикова И. А. Оценка технического уровня качества судового двигателя 138

Мартьянов В. В. Расчет крутильных колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода «ЭРИДАН» ПР. Р19-1 146

Булгаков В. П., Уксусов С. С., Цапко Л. А. Втулка шарнира черпаковой цепи земснаряда из двухслойной борированной стали 153

Куликов В. А. Наблюдаемость выборочных распределений при измерениях в судостроении 158

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 164

Григорьев А. В., Кулагин Ю. А. Судовые системы электродвижения на базе двигательно-движительных систем кольцевой конструкции 164

Родимов Н. В., Сероветников А. С., Сивоконь В. П. Исследование надёжности электроснабжения морской портовой инфраструктуры в приполярном районе 169

Федюк Р. С., Ильинский Ю. Ю., Ибрагимов Д. И. Разработка источника питания устройства для ограничения короткого замыкания на корпус судна 177

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ 186

Зубарев Ю. Я., Кукушкин И. В. Имитационная модель процессов обработки каботажных судов 186

Некрасова А. А., Соколов С. С. Исследование возможности применения теории перколяции для управления потоками данных в информационных сетях на транспорте 192

Жиленков А. А., Титов И. Л., Черный С. Г. Моделирование процесса повышения надежности автоматических систем управления в автономных системах объектов морского транспорта 198

Чертков А. А. Итерационный алгоритм выбора оптимальной стратегии группового взаимодействия подвижных объектов 207

Тарануха С. Н. Дистанционные образовательные технологии в системе качества подготовки членов экипажей судов 216

ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МОРСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ: ТЕНДЕНЦИИ И ВЫЗОВЫ XXI ВЕКА 223

Информация о конференции 223

Министр транспорта Российской Федерации. Участникам Международной научно-практической конференции «Морское образование: тенденции и вызовы XXI века» 226

Барышников С. О. Взаимодействие университета с международными организациями в области морского образования (по материалам доклада) 227

Надежников А., Романов Н. Перспективы развития морского образования и обучения: мнение судовладельцев 229

Панков И. И., Смягликова А. П., Окунев В. Н. Применение методов психологической диагностики для определения текущего состояния профессионально важных качеств моряков 235

Резолюция по итогам конференции 238

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 7

Derjabin V. V., Sazonov A. E. Neuro-fuzzy vessel's dead reckoning model 7

Agarkov S. A. Tanker motion modeling results analysis under the wind 16

Malyhin M. O., Kirichenko A. V. Justification of the original data in the simulation of containers' carriage from sea terminal to dry port with the use of technology «block-train» 22

Krjukov N. D. Recommendations for vessels when navigation in a tropical storms of the Northen Atlantic 31

Ershov A. A., Huharev D. A. Conditions for safe entry of ships in port 38

Bondarenko A. V., Nekrasov V. A., Jastreba A. P. Methodology of selection of optimal structure of the fleet harbour tug 43

Mojseenko S. S. Design risk management system in shipping and oceanic fishery 53

Kurnikov A. S., Mizgirev D. S., Cherepkova E. A. The calculation of hydrodynamic cavitator with toroidal mixing chamber 60

Naumov V. S., Nesterova O. S. Asessment of the probability of pollution of environmentally sensitive areas internal waterways oil and oil products 66

Belov L. B. The ABC method (Activity-Based Costing) in the allocation of operating costs of integrated transportation process 74

Stepanov A. L., Noskova E. V. Staffing of sustainable development of maritime transport infrastructure 83

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 90

Afonin A. B., Tezikov A. L., Lutkov S. A. Features creation of depth contours in the conditions of insufficient hydrographic study of the seabed 90

Kozhuhov I. V., Koloskov E. N., Firsov Ju. G. Electronic engineering hydrography and the prospects of obtaining new results on the morphology and bottom environmental conditions of the arctic seas 95

Timofeeva O. A. Analysis of numerical methods for calculating fluid flow in the culverts 104

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 109

Karklina T. O. Pavlov A. V., Chistov V. B. Enhance the accuracy of residual deflection hull 109

Goloskokov D. P. Calculation of plane overlappings in system of symbolical calculations 119

Nguen N., Ruban A. R. Effect of weld defects on the mechanical properties of the steel body, determined under dynamic loading 126

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 131

Zhukov V. A. Outlook of improving of ship diesel engine's cooling system 131

Borovikova A. I. Evaluation of the technical level of quality marine engine 138

Martjanov V. V. A ship shafting torsional oscillation calculation of the pleasure passenger ship "Eridanus" PR.R19-1 146

Bulgakov V. P., Uksusov S. S., Capko L. A. The dredge chain cherpakova hinge plug from two-layer borirovanny steel 153

Kulikov V. A. Observability sampling distributions when measuring in the marine engineering 158

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 164

Grigorev A. V., Kulagin Ju. A. Theoretical basis of operation modes of ship shaft generator plants with frequency converters and synchronous compensators 164

edition 4(32)
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.

Rodimov N. V., Serovetnikov A. S., Sivokon V. P. Investigation of reliability factor of power supply of port's infrastructure in subpolar areas 169
Fedjuk R. S., Ilinskij Ju. Ju., Ibragimov D. I. Development of power supply devices for limitations short circuit on the ship's hull 177

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 186

Zubarev Ju. Ja., Kukushkin I. V. Imitation model of the coasting ships processing 186
Nekrasova A. A., Sokolov S. S. Study of the possibility of percolation theory for flow control in information networks transport 192
Zhilenkov A. A., Titov I. L., Chernyj S. G. Modeling of increasing the reliability automatic control systems in autonomous systems for maritime transport objects 198
Chertkov A. A. An iterative algorithm for choosing the optimal strategy of group interaction for moving objects 207
Taranuha S. N. Distance education technologies in the quality management system of training seafarers 216

MATERIALS OF INTERNATIONAL PRACTICAL-RESEARCH CONFERENCE «MARITIME EDUCATION AND TRAINING: TRENDS & AND CHALLENGES IN THE XXI CENTURY» 223

Information about the conference 223
Minister of Transport of the Russian Federation. To participants of International practical-research conference «Maritime education and training: trends & and challenges in the xxi century» 226
Baryshnikov S. O. Interaction of university with the international organizations in the field of marine education (based on the report materials) 227
Nadeznikov A., Romanov N. Development prospects of met: shipowners' point of view 229
Pankov I. I., Smjaglikova A. P., Okunev V. N. Psychological assessment methods as measure of current state of sailor's important professional skills 235
The resolution following the results of conference 240

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

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК. 656.61.052

В. В. Дерябин,
канд. техн. наук, доц.;

А. Е. Сазонов,
д-р техн. наук, проф.

НЕЙРО-НЕЧЁТКАЯ МОДЕЛЬ СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ СУДНА

NEURO-FUZZY VESSEL'S DEAD RECKONING MODEL

Рассматривается построение модели счисления пути судна на основе гибридной нейро-нечёткой системы, которая прогнозирует скорость дрейфа судна в условиях влияния на него управляющих и возмущающих воздействий. К возмущающим воздействиям относятся силы, действующие на корпус судна со стороны ветра и волнения. Предполагается, что для ведения счисления используется информация от относительного лага, измеряющего продольную составляющую скорости, и гирокомпаса. Работоспособность построенной системы проверяется при помощи имитационного моделирования с использованием параметров судов нескольких серий. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что в рассмотренных модельных ситуациях нечёткая нейронная сеть прогнозирует скорость дрейфа судна с приемлемой для навигационных целей средней точностью.

In the article the construction of vessel's dead reckoning model on neural-fuzzy inference system basis is considered. Hybrid system predicts vessel's drift velocity in control and disturbances influence conditions. Forces influencing hull by wind and waves are considered as disturbances. It is assumed that for dead reckoning purposes water-speed log, measuring longitudinal component of vessel speed, and gyrocompass are used. Testing of constructed system was carried out by means of imitation modeling for ships of different series. The results of the test let us to resume, that in considered model situations fuzzy neural network predicts speed of vessel drift with mean accuracy acceptable for navigational purposes.

Ключевые слова: счисление пути судна, нейро-нечёткая система, имитационная модель, скорость дрейфа.

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

В НАСТОЯЩЕЕ время известны две основные системы определения счислимых координат места судна. Это системы «навигационного» и «инерциального» счисления. Как правило, в системе «навигационного» счисления информация для вычисления счислимых координат поступает от относительного лага, измеряющего продольную составляющую скорости судна, и гироскопического компаса. В некоторых случаях относительный лаг может измерять и скорость дрейфа судна. Кроме того, возможно определение счислимых координат с использованием абсолютного лага, измеряющего продольную и поперечную составляющие скорости, и гирокомпаса. В системах «инерциального» счисления информация поступает от инерциальных навигационных систем.

Рассмотрим распространенный на практике случай, когда на судне для ведения счисления используется относительный лаг, измеряющий продольную составляющую скорости, и гирокомпас. Для определения поперечной составляющей относительной скорости — скорости дрейфа — могут использоваться различные классические навигационные методы и расчётные методики, в той или иной степени, учитывающие гидро- и аэродинамические особенности конкретного судна. Более точный подход к прогнозированию скорости дрейфа судна в условиях влияния внешних факторов основан на использовании системы дифференциальных уравнений движения суд-

на. Правые части уравнений учитывают, как правило, своими слагаемыми силы, действующие на корпус судна со стороны ветра и волнения, движительно-рулевого комплекса, а также силы сопротивления. Для расчёта указанных сил используются методики, основанные на определённых теоретических и / или эмпирических соображениях, вопрос об адекватности которых реальности в текущих условиях плавания может вызывать сомнения. Действительно, почему, например, выражение для расчёта ветрового воздействия имеет именно такой вид, и не приведёт ли его использование в нестандартных условиях к существенным ошибкам счисления? Вопросы подобного характера приводят к необходимости поиска новых методов расчёта скорости дрейфа судна в условиях влияния внешних факторов, которые бы позволили повысить точность определения счислимых координат места судна.

Изменение скорости дрейфа судна во времени носит, в общем случае, нелинейный характер. Более того, измерение величин, характеризующих движение судна, а также действие на его корпус управляющих и возмущающих воздействий происходит, как правило, в условиях значительной неопределённости. В этих условиях обычно для обработки неточно известных значений используется аппарат теории вероятности. При этом неточность отождествляется со случайностью. Это допущение вызывает большое сомнение. Необходимо различать понятия *нечеткость* и *случайность*. Следует отметить, что именно нечеткость, в первую очередь, влияет на точность. Поэтому в условиях нелинейности и неопределённости перспективным является использование методов «мягких вычислений»: нейронных сетей, нечетких систем и генетических алгоритмов.

В настоящее время известен ряд исследований, в которых предлагается моделирование динамики судна или построение систем счисления его пути на основе методов «мягких вычислений». Отметим некоторые из них, посвященные решению задачи прогноза скорости дрейфа. В статьях [1], [2] предлагается построение нейронной сети, прогнозирующей скорость дрейфа судна в условиях влияния внешних факторов, методика формирования образцов для её обучения и тестирования. Исследования [3] – [5] также посвящены вопросам синтеза нейросетевых систем, прогнозирующих параметры движения судна в условиях влияния управляющих и возмущающих воздействий. В статье [6] рассматривается синтез нейронных сетей, прогнозирующих ускорение дрейфа и производную угловой скорости поворота по времени в условиях внешних возмущений. Недостатком нейронных сетей является невозможность объяснения результата на выходе системы, так как все промежуточные значения распределены по нейронам в виде весовых коэффициентов. В нечетких системах весь процесс получения результата может быть достаточно легко формализован в виде протокола логических рассуждений. Поэтому в настоящее время все чаще используются гибридные системы, позволяющие сохранять достоинства нейронных сетей и нечетких систем. Примеры гибридных нейро-нечётких систем, прогнозирующих кинематические параметры судна, описаны в работах [7], [8]. В настоящей статье исследуется возможность использования нейро-нечёткой системы для прогноза скорости дрейфа судна в условиях влияния внешних факторов.

Определим сначала состав и характер входных и выходных сигналов системы нечёткого вывода. Для имитации движения судна в условиях влияния ветра и волнения используется предложенная в статье [9] модель движения судна в горизонтальной плоскости. В соответствии с указанной моделью дифференциальное уравнение для скорости дрейфа судна имеет следующий вид:

$$m\left(1+k_{22}\right)\frac{dV_{y1}}{dt} = -m\left(1+k_{11}\right)V_{x1}\omega + F_{\nu y1} + F_{Py1} + F_{Ry1} + F_{Ay1} + F_{Wy1}, \qquad (1)$$

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; буква F_{y1} обозначает проекцию сил на поперечную ось, а индексы относятся: ν — к силам и моментам вязкостного трения; P — к поперечной силе гребного винта; R — к влиянию руля; A, W характеризуют 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:

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

где δ — угол перекладки руля; n — число оборотов винта; V_R, α_R — 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.

База правил системы нечёткого вывода строится следующим образом:

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

где символом * обозначены конкретные значения компонент входного сигнала, F — вес соответствующего правила, e — некоторое действительное число. Следует отметить, что количество правил в базе составляет $2^7 = 128$. Такому же числу равно и количество возможных значений выходной переменной.

Фаззификация входных переменных выполняется путём использования функций принадлежности различных типов, причём каждая переменная описывается двумя термами. Слишком большое количество термов может привести к увеличению длительности обучения нейронной сети или к тому, что обучение будет совсем невозможным из-за ограничений по оперативной памяти компьютера.

Агрегирование условий в правилах нечётких продукций осуществляется с использованием операции нечёткой конъюнкции «И». 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. Весовые коэффициенты F всех правил в формуле (2) принимают значения, равные единице. Активизация подзаключений в правилах нечётких продукций представляет собой min-активизацию, причём для ускорения расчётов используются лишь активные правила. Аккумуляция заключений нечётких правил фактически отсутствует, так как в расчётах используются обычные числа. Дефаззификация выходной переменной выполняется с использованием метода центра тяжести для одноточечных множеств. Общий вид нейро-нечёткой системы приведен на рис. 1. По своей структуре гибридная система относится к классу нейро-нечётких систем *ANFIS* (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) [10].

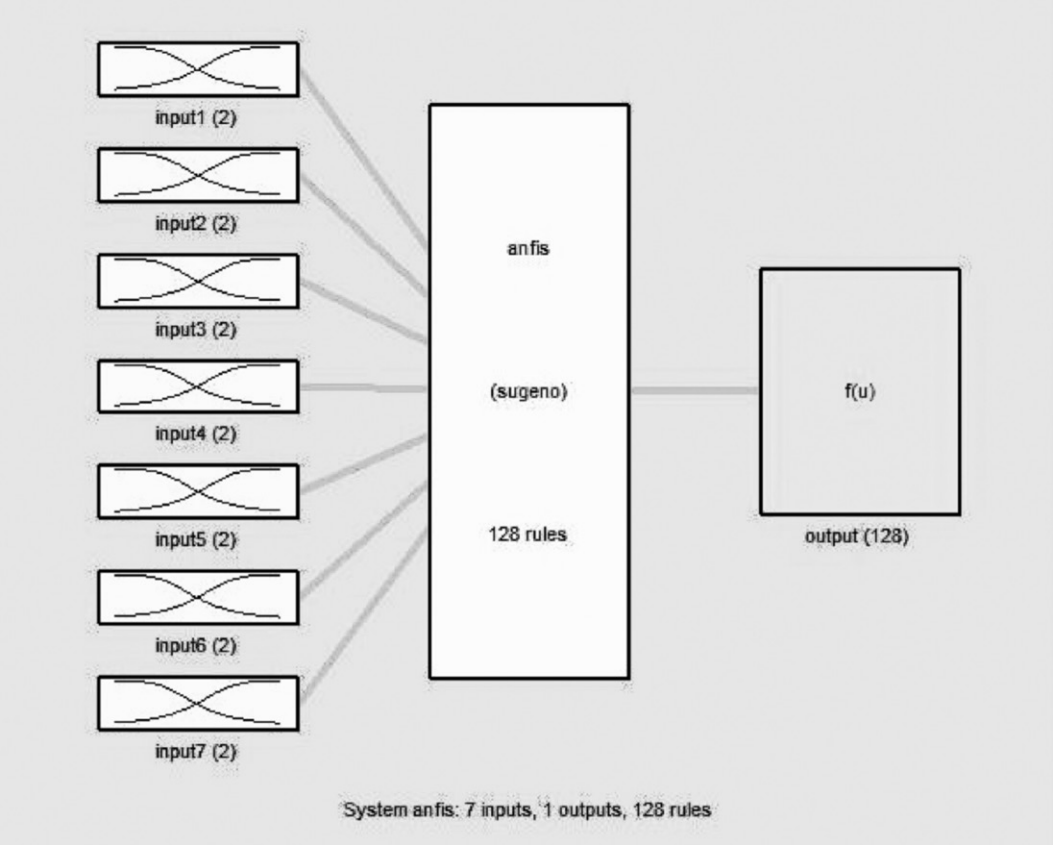


Рис. 1. Общий вид гибридной системы

Следует отметить, что при построении гибридных систем рассматривалось несколько вариантов их архитектуры, характеризующихся следующими функциями принадлежности термов входных переменных:

– треугольными (*trimf*);
– трапециевидными (*trapmf*);
– колоколообразными (*gbellmf*);
– гауссовыми (*gaussmf*);
– комбинациями гауссовых функций (*gauss2mf*);
– П-образными (*pimf*);
– разностями сигмоидальных функций (*dsigmf*)»;
– произведениями сигмоидальных функций (*psigmf*).

При формировании набора учебных данных используются два подхода. Первый из них заключается в применении технологии, описанной в источнике [2] и состоящей в вариации величин управляющих воздействий при плавании судна в условиях влияния ветра и волнения. Особенностью реализации данного подхода является то, что длительность плавания судна при удерживаемых неизменными угле перекладки руля и числе оборотов винта составляет один час. Второй подход основан на формировании образцов по мере текущей эксплуатации судна с использованием классификации вектора входного сигнала. Смысл указанного подхода заключается в следующем. Промежуток возможных значений каждой компоненты входного сигнала разбивается на определённое количество равных участков. Количество таких участков выбирается равным семи. В таком случае насчитывается $7^7 = 823543$ возможных классов для вектора входного сигнала. Формирование образцов происходит на основе записи сигналов в 1000 модельных ситуациях, в которых характеристики внешних факторов выбираются случайным образом, поэтому число повторяющихся (принадлежащих одному классу) входных образцов может отличаться от одной

серии модельных испытаний к другой. Более того, даже если гидрометеорологическая ситуация одна и та же для судов различных типов, то изменение параметров их движения и, соответственно, компонент входного сигнала будет носить уникальный характер для каждого такого судна. В результате число повторяющихся сигналов будет различным от одного судна к другому.

Для обучения нечёткой нейронной сети выбран гибридный алгоритм, представляющий собой комбинацию метода наименьших квадратов и метода убывания обратного градиента [10]. По мере обучения системы проверяется её работоспособность с использованием образцов, которые не принимали участие в настройке её свободных параметров. Число эпох варьируется, как правило, в пределах от 10 до 300 с дискретностью 10. В качестве тестирующего множества при использовании обоих методов обучения выбирается совокупность пар *вход-выход*, формирование которых основано на применении первого метода подготовки образцов. При оценке обобщающих свойств нейронной сети используются следующие характеристики её работоспособности: первая из них – наибольший модуль погрешности прогноза скорости дрейфа e_{max}, вторая – среднее значение модуля ошибки скорости дрейфа e_{mean}.

Построение нейро-нечёткой системы, её настройка и тестирование были выполнены в программной среде MATLAB R2014a для судов пяти серий, основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры моделей судов

Характеристика	Проект «232»	Проект «В-352»	Серия «584Е»	«Севморпуть»	Проект «1511»
Длина по ватерлинию, м	83,1	147,0	176,3	237,3	284,1
Осадка, м	4,65	7,0	9,8	10,4	17,0
Массовое водоизмещение, т	3138	14300	31795	53678	185567
Тип судна	Лесовоз	Лесовоз-контейнеровоз	Балкер	Лихтеровоз	Танкер
Номинальная скорость хода, уз	15,8	13,0	15,3	19,7	15,5

Значения величин e_{max} и e_{mean}, характеризующих качество обучения гибридных систем, полученных на основе тестирующей выборки, для судов различных серий приведены в табл. 2, где приводятся наименьшие значения указанных величин, а также тип функций принадлежности термов входных переменных, для которых системы показывают наилучшую точность прогноза скорости дрейфа. В таблице указывается также способ формирования набора учебных данных. Если образцы были сформированы с использованием классификации вектора входного сигнала, то используется символ «К», в противном случае, когда учебные примеры формируются первым способом, без применения такой классификации, — символ «БК» (жирным шрифтом выделены наилучшие показатели точности).

Таблица 2

Точность прогноза скорости дрейфа на тестирующих выборках

Характеристика точности прогноза	Проект «232»	Проект «В-352»	Серия «584Е»	«Севморпуть»	Проект «1511»
Наибольший модуль погрешности скорости дрейфа e_{max}, м/с	1,85 (*trimf*-БК)	1,32 (*pimf*-К)	**1,12** (*gbellmf*-К)	1,41 (*dsigmf*-БК, *psigmf*-БК)	1,18 (*dsigmf*-К)
Средний модуль погрешности скорости дрейфа e_{mean}, м/с	0,65 (*trimf*-БК, *gbellmf*-БК, *gaussmf*-БК)	0,41 (*trimf*-БК, *gbellmf*-БК, *dsigmf*-БК, *trimf*-К, *gbellmf*-К)	0,36 (*trimf*-К, *gaussmf*-К)	0,39 (*dsigmf*-БК, *psigmf*-БК, *trimf*-К, *gaussmf*-К)	**0,31** (*trimf*-БК, *gbellmf*-БК, *gaussmf*-БК, *gauss2mf*-БК, *psigmf*-БК, *trimf*-К, *gaussmf*-К)

Как видно из табл. 2, процесс коррекции коэффициентов нечёткой нейронной сети имеет ряд особенностей. Во-первых, лучшие по точности результаты для судов различных серий показывают системы с различными функциями принадлежности термов лингвистических переменных. Во-вторых, для некоторых судов наблюдается ситуация, когда наименьшие значения критериев точности соответствуют системам с различными функциями принадлежности термов входных переменных. Например, наименьшей величине e_{max} соответствует система с колоколообразными функциями принадлежности, а e_{mean} — с треугольными и гауссовыми (результаты для серии «584Е»). Наконец, следует отметить закономерность, справедливую для судов всех серий и состоящую в том, что наименьшее среднее значение модуля ошибки скорости дрейфа на тестирующей выборке наблюдается для нескольких систем, имеющих различные функции принадлежности термов лингвистических переменных.

В процессе обучения изменение величины e_{max} — основного критерия способности нейронечёткой системы к обобщению — носит, как правило, явно выраженный немонотонный характер. Типичные графики зависимости указанной величины от номера эпохи приведены на рис. 2.

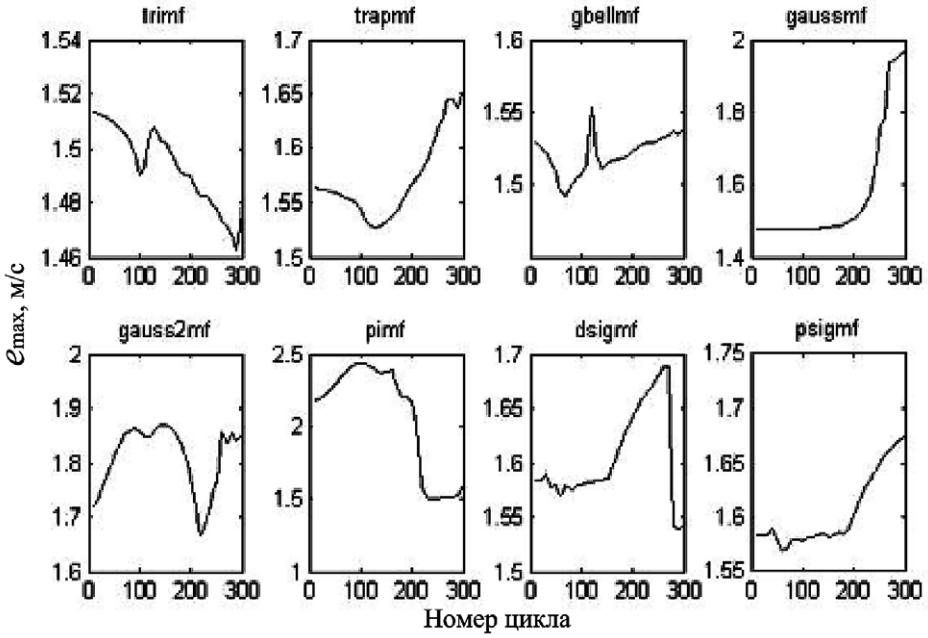


Рис. 2. Графики обучения гибридной модели для лихтеровоза «Севморпуть»

Тестирование гибридных систем было выполнено с использованием специальной методики [2], основанной на принципе постоянства действующих на судно управляющих и возмущающих воздействий. С позиции данного принципа возможны три класса навигационных ситуаций, два из которых имеют подклассы, характеризующиеся постоянным или переменным характером изменения гидрометеорологических условий в процессе плавания. Так как сеть прогнозирует поправки к счислимым координатам, интерес представляет точность определения именно траектории движения судна, характеризующаяся средним и наибольшим значениями максимума модуля невязки на четырёхчасовом промежутке времени плавания. Проверка работоспособности синтезированных систем для судов различных серий была выполнена путём рассмотрения ста модельных ситуаций, в каждой из которых величины, характеризующие внешние факторы и управляющие воздействия, принимали случайно выбранные значения из возможных диапазонов. Было рассмотрено 20 модельных ситуаций первого класса и по 40 ситуаций второго и третьего классов.

Для судна каждой серии было синтезировано по 16 гибридных систем, каждая из которых отличается типом функции принадлежности термов входных переменных и/или методикой формирования образцов для настройки её коэффициентов. В тестировании принимали участие четы-

ре системы для судов каждой серии, показавшие по два лучших результата по критерию e_{max} для обоих методов формирования образцов. Результаты проверки работоспособности нечётких нейронных сетей приведены в табл. 3 (жирным шрифтом выделены наилучшие показатели точности).

Таблица 3

Результаты тестирования гибридных систем

Характеристика точности счисления	Проект «232»	Проект «В-352»	Серия «584Е»	«Севмор-путь»	Проект «1511»
Наибольшее значение максимума модуля невязки за 4 ч плавания, мили	**8,15**	12,53	10,57	15,47	15,12
Наибольший модуль ошибки скорости дрейфа, м/с	13,43	9,10	9,39	12,08	**8,87**
Среднее значение максимума модуля невязки за 4 ч плавания, мили	**1,83**	2,27	2,97	2,08	2,31
Средний модуль ошибки скорости дрейфа, м/с	0,84	0,62	0,75	0,63	**0,55**

Таким образом, результаты тестирования гибридных систем, используемых для счисления пути судов различных типов, позволяют сделать следующие выводы.

1. Точность прогноза траектории синтезируемой гибридной системой довольно низкая. Система позволяет получать координаты судна лишь с удовлетворительной средней точностью. Низкая точность наблюдается и при прогнозировании скорости дрейфа судна.

2. Наблюдались ситуации, когда для судна одного типа наилучшая точность по максимальному и среднему значениям модуля невязки обеспечивалась системами, термы лингвистических переменных которых описывались различными функциями принадлежности.

3. Наблюдались ситуации, когда для судна одного типа лучшие результаты по точности определения скорости дрейфа и траектории показывали системы с различными функциями принадлежности термов входных переменных.

4. Нечёткие сети, которые обучаются на образцах, получаемых с применением принципа классификации входного сигнала, демонстрируют в ходе тестирования, как правило, лучшие результаты по сравнению с системами, обучающие множества которых формируются без такой классификации.

Причина невысокой точности синтезируемой системы может заключаться в неоптимальном выборе вида входного сигнала, в несовершенстве её архитектуры, методики подготовки учебных данных и алгоритма настройки её коэффициентов. Рассмотрим данные причины более подробно. Составляющие вектора входного сигнала X оказывают различное влияние на величину скорости дрейфа судна. В первую очередь, следует заметить, что вторая компонента входного сигнала x^2 представляет собой интеграл скорости дрейфа судна, которую и прогнозирует система. Для вычисления данной компоненты в рабочем режиме необходимо знание значения скорости дрейфа судна в текущий момент времени, в качестве которого принимается величина скорости, спрогнозированная сетью на предыдущем временном шаге. Иными словами, синтезированная система является рекуррентной. При этом ошибка прогноза скорости в данный момент времени приведёт к ошибке её определения в последующем. Поэтому роль данной составляющей в прогнозе выходного сигнала велика. Кроме того, известно, что, например, боковая сила со стороны винта оказывает, как правило, незначительное влияние на величину скорости дрейфа судна. Таким образом, возникает задача определения удельного веса каждой компоненты входного сигнала при влиянии на скорость дрейфа. Подобная задача может быть решена в результате обработки большого количества экспериментальных данных для конкретного судна.

Проблема определения оптимального вида вектора входного сигнала не сводится, однако, только к проблеме назначения весовых коэффициентов его компонент. Она также включает во-

просы определения оптимального интервала Δt, на котором выполняется интегрирование величин при формировании составляющих вектора входного сигнала. С одной стороны, слишком малые значения Δt приведут к большой чувствительности компонент входа на случайные погрешности измерений интегрируемых величин. С другой стороны, если продолжительность интервала Δt принимает существенные значения, то от одного момента времени к другому при малой дискретности измерений векторы входного сигнала практически не будут в смежные моменты времени отличаться один от другого. Поэтому для больших значений Δt потребуется, возможно, рассмотрение большего числа модельных ситуаций, чтобы обеспечить необходимые количество и качество входных образцов.

При синтезе гибридной системы, прогнозирующей скорость дрейфа судна в условиях влияния внешних факторов, так или иначе, приходится выбирать порядок *системы Сугено* (нулевой или первый), вид и количество функций принадлежности термов входных или выходных лингвистических переменных и т.д. Иными словами, существует проблема определения оптимальной архитектуры нечёткой нейронной сети. Найти оптимальную архитектуру системы, исходя из каких-либо теоретических соображений, в настоящее время не представляется возможным, поэтому данный вопрос может быть решён лишь на основе обработки большого количества эмпирических данных.

Методика подготовки учебных данных должна, в первую очередь, быть применима в реальных условиях плавания конкретного судна. Иными словами, следует учитывать факт ограниченности реальных навигационных ситуаций, на основе которых формируется множество учебных примеров. В связи с этим модельные ситуации должны быть организованы таким образом, чтобы, с одной стороны, их было можно повторить в натурном эксперименте, а с другой — образцы, сформированные на их основе, выражали бы основные свойства конкретного судна как физического тела. Алгоритм настройки свободных параметров гибридной системы должен в идеале обеспечить поиск их оптимальных значений, соответствующих глобальному минимуму целевой функции. При реализации того или иного алгоритма обучения возникает также вопрос выбора целевой функции, в качестве которой могут использоваться различные величины: средний квадрат ошибки скорости дрейфа на обучающей или тестирующей выборке, наибольшее значение ошибки и др.

Поиск путей решения задач, направленных на повышение точности синтезируемых гибридных систем, осложняется тем, что неизвестно, будет ли их решение однозначным для судов всех типов. В самом деле, например, методика формирования образцов, оптимальная для судна одной серии или типа, может оказаться далеко не оптимальной для судов других серий. Однозначного и точного ответа на поставленный вопрос, очевидно, не существует, так как требуется рассмотрение динамики судов исключительно всех существующих типов во всех возможных навигационных ситуациях. Последнее представляет собой практически невыполнимую задачу. Приближённое её решение может быть получено при использовании классификации судов и условий их плавания.

Поиск оптимального вида входного сигнала системы, оптимальной её архитектуры и методики обучения приходится выполнять на основе имитационного моделирования динамики судна в различных условиях плавания. Однако окончательный вывод о работоспособности построенной нейро-нечёткой системы, если и может быть сделан, то лишь на основе обработки данных натурных наблюдений. В связи с этим возникает проблема разработки технологии их проведения, позволяющей сделать вывод с заданной степенью уверенности о работоспособности тестируемой системы.

Наряду с рассмотренными ранее вопросами, решение которых дает возможность повысить точность синтезируемой системы, существует также проблема синтеза системы, позволяющей определять счислимые координаты судна с оценкой их точности. Наконец, существует проблема синтеза нейро-нечёткой системы с заданным уровнем точности с учётом погрешностей определения векторов входного и выходного сигналов. Ошибки определения величин, на основе которых формируются сигналы, оказывают влияние на точность прогноза системы параметров движе-

ния судна двояко: с одной стороны, они вносят неопределённость в коэффициенты сети на этапе идентификации, а с другой, уменьшают точность прогноза в рабочем режиме системы. Следует отметить, что в процессе настройки коэффициентов гибридной системы ошибки данных и методические погрешности алгоритма обучения действуют совместно. Таким образом, задача синтеза системы с заданным уровнем точности может быть сформулирована следующим образом: «*Определить, с какой погрешностью должны быть измерены величины, на основе которых формируются образцы на стадии обучения, чтобы в рабочем режиме невязка не превышала заданное значение за определённое время плавания*».

Рассмотренная в настоящей статье гибридная система прогнозирует скорость дрейфа судна, получить точное значение которой на основе экспериментальных данных можно лишь в случае, если на судне имеется лаг, измеряющий указанную составляющую скорости. Большинство относительных лагов, устанавливаемых на суда, измеряют лишь продольную составляющую вектора скорости. В то же время, практически на каждом морском судне имеется приёмник спутниковой навигационной системы, позволяющей получать точные координаты с дискретностью, равной одной секунде. В связи с этим особый интерес представляет синтез гибридной системы, выходным сигналом которой является вектор координат судна или, по меньшей мере, их приращений. Преимуществом использования координат в качестве компонент выходного сигнала системы является также отсутствие этапа численного интегрирования скорости судна, характеризующегося определёнными методическими ошибками.

В работе [11] изложен подход к использованию нейро-нечёткой системы для прогноза координат места судна. Однако в указанном исследовании *ANFIS* представляет собой адаптивную по отношению к траектории движения судна систему, обучение которой выполняется в режиме реального времени по мере обновления данных о координатах места судна. Фактически нечёткая нейронная сеть работает в режиме адаптивного фильтра, не выполняя функцию идентификации модели движения судна в условиях влияния внешних факторов.

Синтезирована гибридная система, которая прогнозирует скорость дрейфа судна в условиях влияния на него управляющих и возмущающих воздействий. Оптимальные значения параметров функций принадлежности термов лингвистических переменных настраиваются градиентным методом оптимизации на основе эталонных ситуаций, полученных с использованием имитационной модели движения судна. Другими словами, гибридная система выполняет функцию идентификации модели движения судна в условиях внешних возмущений. Результаты тестирования системы в различных навигационных ситуациях для судов различных серий позволяют сделать вывод о том, что она прогнозирует скорость дрейфа судна в рассмотренных модельных ситуациях с приемлемой для навигационных целей средней точностью. В рассмотренных модельных ситуациях установлена зависимость обобщающей способности нейро-нечёткой системы от типа функций принадлежности термов её лингвистических переменных, а также способа формирования образцов. Дальнейшие исследования в области применения нейро-нечётких систем для построения модели счисления пути судна должны быть направлены на повышение точности прогноза параметров движения судна, которое может быть достигнуто путём совершенствования методик определения оптимального вида сигналов системы, её архитектуры, технологии формирования набора учебных данных и настройки параметров коэффициентов сети.

Список литературы

1. *Дерябин В. В.* Применение нейронной сети в модели счисления пути судна / В. В. Дерябин // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 3 (65). — С. 20–27.

2. *Дерябин В. В.* Прогнозирование скорости дрейфа судна на основе нейронной сети / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2014. — № 5. — С. 3–7.

3. *Ebada A.* Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation, Institute of Ship Technology und Transport Systems / A. Ebada. — Germany. — 2007. — 156 p.

4. *Moreira L.* Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks / L. Moreira, C. G. Soares // Ocean Engineering. — 2003. — Vol. 30. — P. 1669–1697.

5. *Zak B.* Modelling of ship's motion using artificial neural networks / B. Zak, J. Malecki, Z. Kitowski // Advances in Neural Networks and Applications, World Scientific and Engineering Society Press. — 2001. — P. 298–303.

6. *Ведякова А. О.* Идентификация в условиях внешнего возмущения с использованием нейронных сетей / А. О. Ведякова // International Journal of Open Information Technologies. — 2014. – Vol. 2. — № 3. — P. 18–22.

7. *Ning W.* A Novel Vessel Maneuvering Model via GEBF Based Fuzzy Neural Networks / W. Ning, W. Dan, L. Tieshan // Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, July 25–27, Hefei, China. — 2012. — P. 7026–7031.

8. *Valcic M.* Anfis Based Model for Ship Speed Prediction / M. Valcic, R. Antonic, V. Tomas // Brodo Gradnja. — 2011. — 62 (4). — P. 373–382.

9. *Дерябин В. В.* Модель движения судна в горизонтальной плоскости / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2013. — № 6. — С. 60–67.

10. *Леоненков А. В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 736 с.

11. *Дерябин В. В.* Адаптивные алгоритмы фильтрации в задаче прогноза координат места судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 12–19.

УДК [656.052.55+629.5.035]:629.5.018.71:004.4.942

С. А. Агарков,
д-р экон. наук, проф.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТАНКЕРА В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

TANKER MOTION MODELING RESULTS ANALYSIS UNDER THE WIND

Актуальность исследований в области совершенствования способов управления судном подтверждается большим количеством статей, публикуемых исследователями в этой области. В данной статье рассматривается компьютерное моделирование маневров неуправляемого танкера в условиях действия ветра как предварительный этап исследований принципа управления танкером при помощи отклонений двух разнесенных точек диаметральной плоскости танкера от линии, называемой прицельной. Показаны возможности моделирующей программы. Представленные результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что предложенная компьютерная система способна моделировать выполняемые танкером операции и пригодна для дальнейших исследований.

The relevance of research in the field of improving vessel control methods confirmed by a large number of articles published by researchers in the area. This article describes computer simulation exercises are not operated tanker under the action of the wind. This is a preliminary phase of research of the management principle tanker using deviations of two separated points of the center plane of the tanker from the line, called the sighting. Features of simulator had been demonstrated. Presented simulation results lead to the conclusion that the proposed computer system can simulate the operations performed by the tanker, and is suitable for further studies.

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

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

Введение

При решении задач, связанных с совершенствованием способов и методов выполнения швартовных операций, на наш взгляд, следует, прежде всего, обратить внимание на методы и способы применения современных компьютерных технологий на базе существующих технических средств, используемых в судовождении. В данном случае имеются в виду судовые технические средства, позволяющие осуществлять непрерывный контроль за основными кинематическими и динамическими параметрами движения судна. На основании этой информации можно управлять судном в соответствии с заданными сигналами управления, которые рассчитываются по выработанным алгоритмам, исходя из обстоятельств, складывающихся в процессе маневрирования.

Инновационный принцип управления по отклонениям носовой и кормовой точек судна от некоторой линии, которая далее называется *прицельной* [1], [2], требует проверки его работоспособности. Эту проверку можно провести только с использованием математического и компьютерного моделирования. Рассмотрим применение такого моделирования в частном случае движения танкера с целью демонстрации возможностей разработанной программы. Данный способ управления судном уже был продемонстрирован в работах [3] – [8], но при моделировании иных операций.

Основная часть

Прежде чем исследовать движения танкера в условиях управления по отклонениям, смоделируем движения танкера лагом в условиях внешних воздействий. При этом лаговые движения не протекают в течение длительного времени. Возникший вращающий момент разворачивает судно и далее оно движется иным образом, т. е. не лагом. Для танкера это характерно, так как его центр парусности смещен в корму относительно плоскости мидель-шпангоута за счет значительной площади парусности кормовой надстройки. Для рассматриваемого в данной работе танкера (проект ASC-6500), находящегося в грузу, указанное смещение в корму достигает примерно 14 м. Поэтому именно система управления по отклонениям должна обеспечить поступательное движение лагом для осуществления правильной швартовки танкера.

Проведем ряд модельных экспериментов при действии ветра и работе двух подруливающих устройств танкера при постоянном режиме их нагрузки в процессе движения. На рис. 1 – 4 показаны траектория и положение на ней танкера в различные моменты движения. В данном случае на танкер оказывает действие ветер, скорость которого составляет 10 м/с с направления 330°, при этом начальный курс танкера 60°, в работе находятся два подруливающих устройства — носовое и кормовое, обеспечивающих постоянную суммарную тягу 40 кН (2 × 20 кН) в направлении правого борта.

На рис. 1 показана траектория танкера (слева) в описанных ранее условиях и положение танкера (справа) на 205 с движения. Синий кружок на траектории – место центра тяжести танкера в указанное время. На рис. 2 приведены те же данные для 440 с движения. Хорошо виден разворот танкера под действием приложенных усилий от ветра и подруливающих устройств. Аналогичными являются рис. 3 и 4 для моментов времени 1223 с и 1698 с соответственно.

Примечание. На рис. 1 – 4 оранжевой линией на правом поле обозначено направление движения ЦТ танкера, т. е. направление касательной к траектории в данный момент времени.

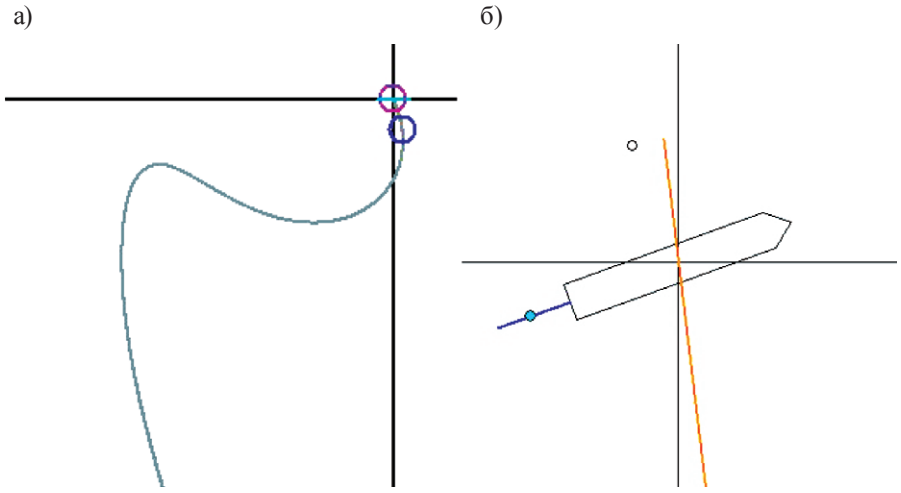


Рис. 1. Траектория (*а*) и положение (*б*) на ней танкера на 205-й секунде движения

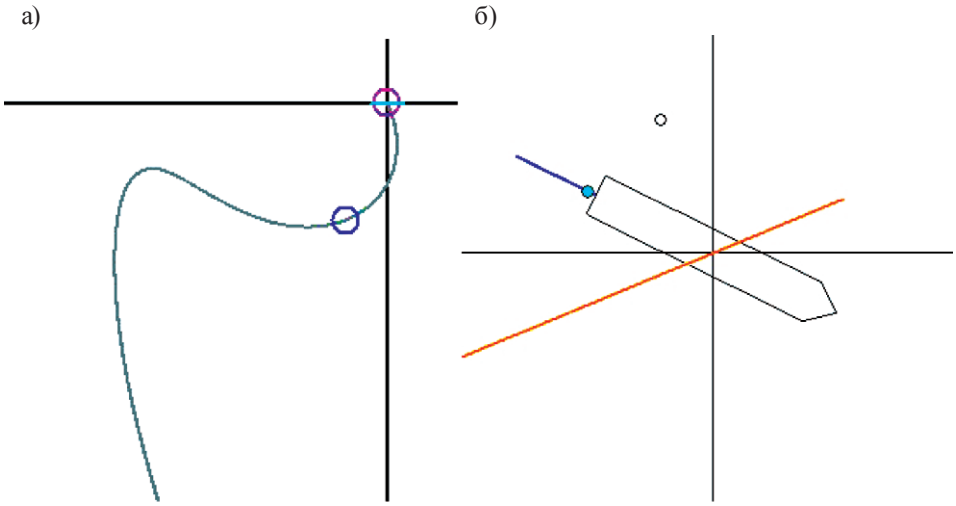


Рис. 2. Траектория (*а*) и положение (*б*) на ней танкера на 440-й секунде движения

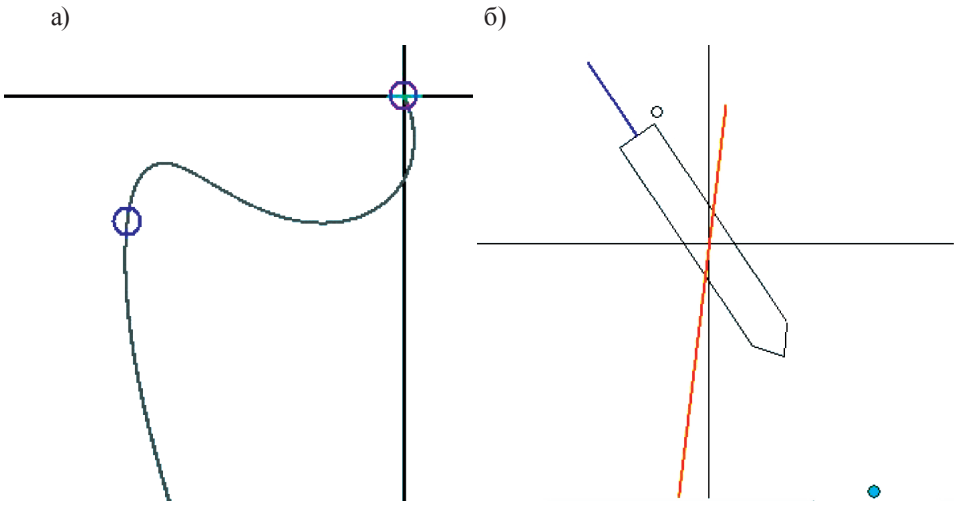


Рис. 3. Траектория (*а*) и положение на ней танкера (*б*) на 1223-й секунде движения

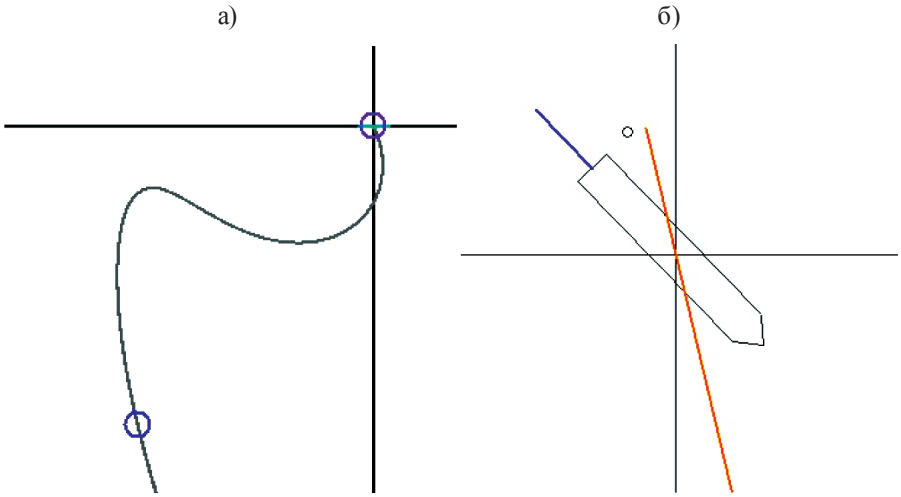


Рис. 4. Траектория (а) и положение (б) на ней танкера на 1698-й секунде движения

Рассмотрим, как изменяются траектории движения танкера при вариациях действующих усилий. Для этого проведено моделирование с изменением силы ветра и тяговых усилий подруливающих устройств. Результаты таких изменений траекторий приведены на рис. 5 и 6.

На рис. 5 приведены три траектории танкера при разной силе ветра с направления 330° или с направлением ветрового усилия. Ветровое усилие и тяги ПУ таковы, что танкер поворачивается по часовой стрелке под действием вращающего момента. По мере поворота эффективность действия ПУ уменьшается, направление тяги составляет угол, близкий к 90° с направлением ветрового усилия, и танкер начинает дрейфовать по линии ветра с установившейся скоростью 0,6 м/с, 0,9 м/с и 1,4 м/с при скорости ветра 10 м/с, 15 м/с и 20 м/с соответственно. Чем выше скорость ветра, тем короче первый, переходный этап движения танкера.

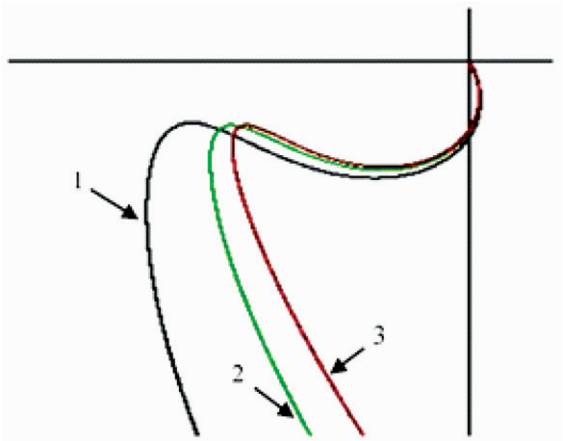


Рис. 5. Траектории танкера при различных значениях ветра:
1 — 10 м/с; *2* — 15 м/с; *3* — 20 м/с и тяге по 20 кН в сторону правого борта

На рис. 6 приведены четыре траектории танкера при силе ветра 10 м/с с направления 330° и различных значениях суммарной тяги ПУ. Эти траектории соответствуют следующим значениям суммарной тяги: 0 кН, 20 кН, 30 кН и 40 кН (нижние части траекторий, расположенные справа налево (*1 – 4*)). Характер траекторий такой же, как и при смене силы ветра. Переход к установившейся части траектории происходит тем быстрее, чем меньше суммарная тяга, т.е. быстрее всего на траектории *4*, когда действует только ветер, и медленнее всего на траектории *1*, когда моменту от ветра противодействует максимальный момент от тяги в 40 кН.

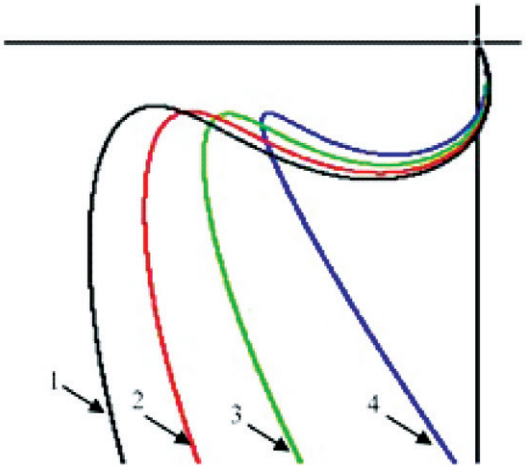


Рис. 6. Траектории танкера при суммарной тяге подруливающего устройства:
1 — 0 кН; *2* — 20 кН, *3* — 30 кН; *4* — 40 кН

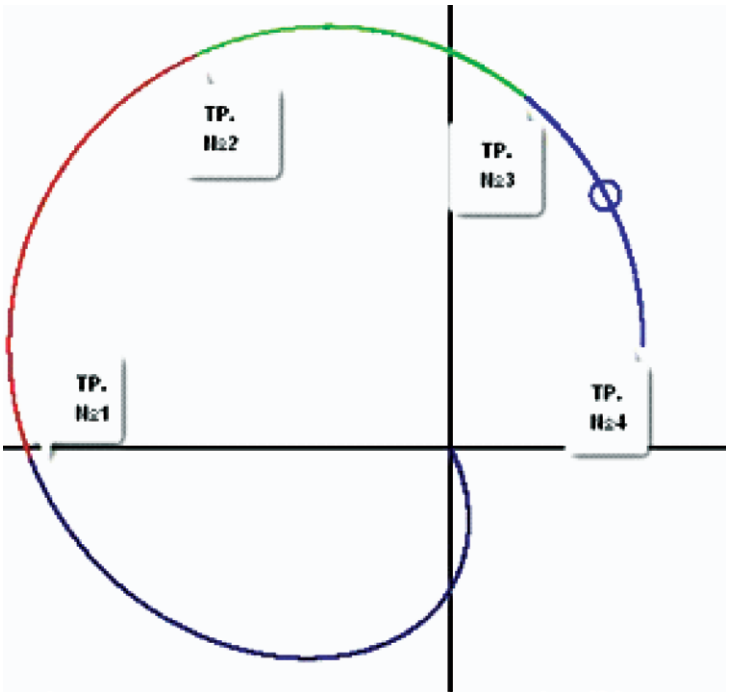


Рис. 7. Траектории танкера при действии только подруливающих устройств
с различной суммарной тягой двух ПУ (20, 50, 80 и 110 кН), траектории № *1 – 4* соответственно

Отдельно смоделирована ситуация, когда ветра нет и действуют только подруливающие устройства. В частности, на рис. 7 приведены четыре траектории танкера для различных суммарных тяг ПУ. Все траектории прослеживаются на протяжении 3000 с. Фактически, траектория для всех этих воздействий ПУ одна, но она прерывается в разных точках единой траектории, из-за разной скорости движения вдоль нее. На рис. 7 с помощью выносок показаны концы этих траекторий, сами траектории обозначены разным цветом, перекрывающим друг друга. Самая короткая траектория «черная» (№ *1*) с финальной скоростью 0,3 м/с, следующая траектория «коричневая» (№ *2*) со скоростью 0,5 м/с, затем «зеленая» (№ *3*) со скоростью 0,6 м/с и, наконец, «синяя» (№ *4*) со скоростью 0,7 м/с. ЦТ танкера медленно перемещается вдоль этой траектории, вращаясь одновременно вокруг ЦТ. Вращение вызвано тем, что тяги не сбалансированы по моменту из-за раз-

ного положения ПУ вдоль ДП танкера. Этот момент и вызывает поворот танкера, приводящий к различным значениям угловых скоростей в конце соответствующей траектории через 3000 с движения: 3 град/с, 4,7 град/с, 6 град/с и 7 град/с соответственно.

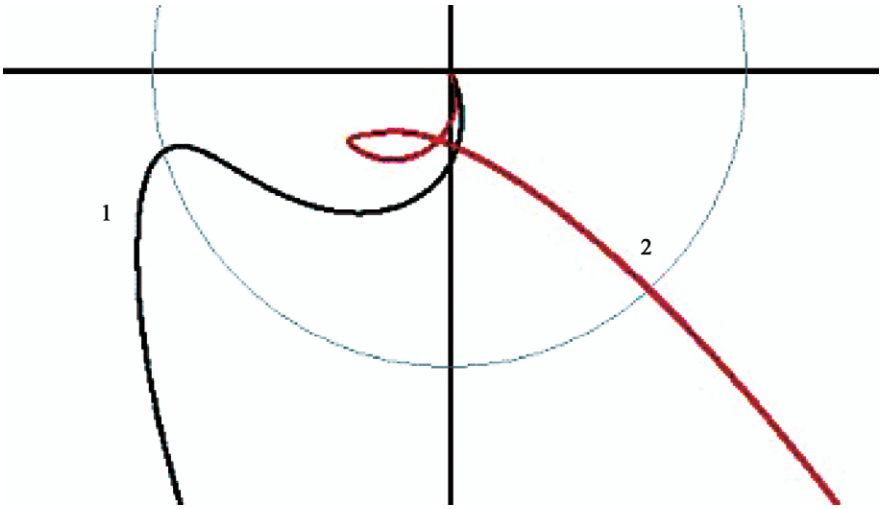


Рис. 8. Траектории танкера при действии ветра 10 м/с с направления 330° при суммарной тяге подруливающего устройства:
1 — 40 кН на правый борт; *2* — 40 кН на левый борт

На рис. 8 приведены две траектории для действия ветра 10 м/с с направления 330° и двух суммарных тяг в 40 кН, направленных в противоположенные стороны — на правый борт (кривая *1*) и на левый борт (кривая *2*). Траектория *1* нам хорошо знакома; на траектории *2* ветер и суммарный момент от тяг и момент от ветра направлены в одну сторону, и поэтому танкер переходит к установившемуся дрейфу в направлении ветра быстрее, чем на траектории *1*, где эти моменты противоположны. На рис. 8 показан масштаб изображения с помощью окружности радиуса 300 м. Масштаб всех предыдущих изображений траекторий точно такой же, хотя в этих конкретных случаях он не играет существенной роли. Все данные о движении модели мы получаем не с помощью изображений, а с помощью записанных в массивах всех без исключения кинематических и силовых параметрах движения с возможностью передачи их в файлы и затем в любые вычислительные среды, например, в MathCad. Такая процедура обработки результатов нам знакома по предыдущим работам [9], [10].

Выводы

1. На частном примере движения танкера под действием ветра показаны возможности программы моделирования маневров.

2. Продемонстрированы возможности варьирования различных параметров маневрирования, связанных с танкером и средой, а также получения разнообразной информации, необходимой для причинно-следственного анализа движения, чем подтверждается возможность применения программы для решения задач по управлению танкером по отклонениям.

Список литературы

1. Пат. 2509031 Российская Федерация, МПК B 63 H 25/52 (2006.01). Способ управления судном при выполнении им швартовной операции к борту судна партнера, стоящего на якоре / Ю. И. Юдин, В. В. Иванов, С. Н. Холичев, С. О. Петров. — № 2012143196/11; Заявлено 09.10.2012; Опубл. 10.03.2014. — Бюл. № 7. — 9 с.

2. *Юдин Ю. И.* Способ управления судном при выполнении им швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре: тр. Мурман. гос. техн. ун-та / Ю. И. Юдин, С. Н. Холичев, С. О. Петров. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2013. — Т. 16. — № 1. — С. 187–192.

3. *Холичев С. Н.* Моделирование процесса швартовки к борту судна-партнера на финальном этапе сближения судов «борт к борту» с использованием инновационного способа управления судном: тр. Мурман. гос. техн. ун-та / С. Н. Холичев, С. А. Агарков. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 88–93.

4. *Холичев С. Н.* Моделирование процесса швартовки к борту судна-партнера с использованием инновационного способа управления судном: тр. Мурман. гос. техн. ун-та / С. Н. Холичев, Ю. И. Юдин, С. О. Петров. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. – Т. 18. — № 1. — С. 81–87.

5. *Юдин Ю. И.* Моделирование процесса управляемого движения судна вдоль линии положения: тр. Мурман. гос. техн. ун-та / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2013. – Т. 16. — № 1. — С. 141–147.

6. *Юдин Ю. И.* Моделирование управляемого движения судна по произвольной траектории / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев // Эксплуатация водного транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 32–36.

7. *Петров С. О.* Моделирование движения танкера на нефтяном терминале в открытом море при управлении на перекрестии: тр. Мурман. гос. техн. ун-та / С. О. Петров, Ю. И. Юдин, С. Н. Холичев. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. — Т. 18. — № 3. — С. 60–67.

8. *Петров С. О.* Стратегия управления движением танкера на перекрестие: тр. Мурман. гос. техн. ун-та / С. О. Петров, С. А. Агарков. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 55–59.

9. *Udin U.* Parametric identification of the mathematical model of marine moving object using the apparatus of variational calculus / U. Udin, S. Pashentsev, S. Kholichev // Transport problems: Proceedings of VI International Scientific Conference. — 2014. — P. 735−744.

10. *Агарков С. А.* Параметрическая идентификация обобщенной модели Номото с помощью аппарата вариационного исчисления / С. А. Агарков, С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 7–11.

УДК 656.615

М. О. Малыхин,
инж.;

А. В. Кириченко,
д-р техн. наук, проф.

ОБОСНОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЫВОЗА КОНТЕЙНЕРОВ ИЗ ПОРТА НА ТЫЛОВОЙ ТЕРМИНАЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ «БЛОК-ТРЕЙН»

JUSTIFICATION OF THE ORIGINAL DATA IN THE SIMULATION OF CONTAINERS' CARRIAGE FROM SEA TERMINAL TO DRY PORT WITH THE USE OF TECHNOLOGY «BLOCK-TRAIN»

Выполнено исследование проблемы российских контейнерных портов в части ограниченной пропускной способности вследствие размещения терминалов внутри крупных городов. Применение технологии «сухой порт» позволяет повысить пропускную способность порта и увеличить операционную прибыль терминала, но возникают дополнительные расходы по организации транспортного сообщения между фронтальным и тыловым терминалом и необходимость планирования режимов работы данного сообщения. Приведено описание транспортного сообщения между фронтальным и тыловым терминалом посредством железнодорожного транспорта с применением технологии ускоренного контейнерного поезда (технология «блок-трейн»). Определение режима работы данного логистического звена и ее оптимизация

решается при помощи построения имитационной модели в среде «AnyLogic». С целью повышения адекватности модели проведена статистическая выборка данных по поступлению импортных контейнеров на АО «Первый контейнерный терминал» (г. Санкт-Петербург) и установлен закон распределения, описывающий данное поступление. Его обоснование осуществлено с применением метода сравнения эмпирических и теоретических кривых, а также критерия Пирсона. Другие данные, необходимые для осуществления моделирования, получены с помощью математических расчетов и методов экспертных оценок. Целью моделирование является определение режима перевозок импортного грузопотока и определение необходимого числа железнодорожных фитинговых платформ.

The purpose of this article is to describe the problems of Russian container ports in part due to the limited capacity of terminal locations in major cities. Application of technology «dry port» allows to increase the capacity of the port, and its operating profit, but there are additional costs for the organization of transport between the front and rear terminal and the need for planning modes this transport connection. Describestransport connection between the front and rear terminal by rail transport using the technology Block-train .The definition of mode this logistics chain and its optimization is solved by constructing a simulation model in the «AnyLogic». In order to improve the adequacy of the model was carried out statistical sampling data entry of imported containers at First Container Terminal and defined the law of distribution that describes this entry. Its study carried out using the method of comparison of empirical and theoretical curves, as well as with the use of Pearson criterion. Other data necessary to carry out simulation derived mathematical calculations and methods of expert estimates. The purpose of modeling is to determine the mode of transportation of imported cargo and the necessary number of railway flatcars.

Ключевые слова: логистика добавленной стоимости, «сухой порт», технология «блок-трейн», имитационная модель, закон распределения, исходные данные.

Key words: value added logistics, «dry port», technology «Block-train», simulation model, distribution law, initial data.

Условия вывоза контейнеров из внутригородского порта

Глобализация мировой экономики, географическое распределение мировых центров по производству и распределению товаров, обусловленное различными темпами экономического роста географических регионов планеты, а также необходимость оперативной перевозки сырья и готовой продукции послужили мощным толчком к развитию мировой транспортной системы во второй половине XX в. Контейнеризация мировых перевозок позволила размещать производство товаров на различных континентах с целью ускорения темпов экономического развития данных регионов и поддержания конкурентоспособности продукции.

Активная интеграция России в мировую экономику, усилившаяся в десятки раз в конце XX в., несмотря на периодически возникающие кризисы, привела к увеличению роста экспортного и импортного потоков. Из всех действующих на Балтике российских портов, имеющих контейнерные терминалы, только ОАО «Морской торговый порт Усть-Луга», который был введен в эксплуатацию в XXI в., расположен вне городской черты. Другие крупнейшие контейнерные терминалы располагаются внутри города федерального значения — Санкт-Петербурга. Таким образом, увеличение пропускной способности порта ограничено естественным фактором — отсутствием возможного увеличения площади береговой инфраструктуры. В условиях ограниченной портовой территории стивидоры вынуждены вводить повышенные ставки за хранение контейнеров с целью стимулирования операторов грузопотоков к максимальному уменьшению периода нахождения контейнеров на морском терминале, а также исключать из перечня услуг операции, задерживающие контейнеры на фронтальной площадке, такие как консолидация, растаривание и перетаривание, что позволило бы создать добавленную стоимость услуг, повысить уровень доходов стивидоров и налоговые отчисления. Все эти факторы в совокупности с продолжительным периодом импортного таможенного оформления и возникающими дополнительными расходами по хранению контейнеров в порту спровоцировали некий отток импортных грузопотоков с терминалов порта Санкт-Петербург в иностранные порты прибалтийских стран, имеющие сухопутные границы с Россией, такие как Эстония, Латвия, Литва и Финляндия.

Необходимо отметить отрицательный фактор внутригородского расположения портовой территории — экологический. В Санкт-Петербурге почти 90 % контейнеров перевозится автотранспортом, что оказывает ярко негативное воздействие на состояние внутригородской среды, а также существенно ухудшает транспортную обстановку в городе. Существующая инфраструктура железнодорожного транспорта и сложно прогнозируемое время нахождения контейнеров в порту, ввиду таможенного оформления, делают железнодорожное сообщение целесообразным только при экспортных поставках [1] – [4].

Строительство замещающих портовых мощностей вне городской черты является дорогостоящим и сложным проектом не только в технологическом, но и в социальном плане. В качестве примера можно привезти порт Усть-Луга, строительство которого продолжается уже более двадцати лет, одной из основных проблем здесь является обеспечение рабочей силой портовых мощностей.

Технология «сухой порт» как способ увеличения пропускной способности порта. Признаки сухого порта, положительные и отрицательные факторы его применения

Одним из основных способов, позволяющих решить проблемы внутригородского расположения морского порта, является введение в эксплуатацию так называемого «сухого порта», который является тыловым терминалом фронтальной площадки. Основным признаком такого терминала является его вывод за городскую черту. При этом мировая практика показывает, что тыловой терминал может находиться как в нескольких километрах от морского порта, так и на удалении в несколько сотен километров от побережья. Наличие его внутри континента указывает на непосредственную интеграцию данного региона в мировую торговлю. В качестве бассейнового примера данного объекта транспортной инфраструктуры можно назвать терминалы в пос. Шушары и Янино [3].

Применение технологии «сухой порт» позволяет перераспределить функции: морской или фронтальный терминал выполняет исключительно перевалочные функции, а «сухой порт» выполняет функции по технологическому накоплению в ожидании формирования партии, проведению таможенного оформления, консолидации грузов и товарных партий, создавая, таким образом, «логистику добавленной стоимости». Также «сухой порт» позволяет нивелировать колебания грузопотока, вызванных, в том числе сезонными факторами, выполняя руль буфера, и применить железнодорожный транспорт для обслуживания грузопотока, избегая существенных простоев подвижного состава [3] – [6].

В мировой практике товарораспределения «сухие порты» берут на себя функции дистрибьюторских центров, при этом они могут располагаться не только вблизи морских терминалов; их удаление от морских побережий может составлять до 1000 км. Наличие тыловых терминалов, несомненно, помогает регионам, удаленным от морских перевалочных узлов, интегрироваться в мировую экономику [3], [6].

Основными признаками наличия технологии «сухой порт» по отношению к морскому терминалу являются следующие:

– управление фронтальным и тыловым терминалом осуществляется единым оператором;

– между терминалами осуществляется бесперебойное транспортное сообщение, в том числе железнодорожным транспортом;

– предусмотрена специальная таможенная процедура, позволяющая упрощенное перемещение грузов, находящихся под таможенным контролем, между терминалами;

– наличие единой гармонизированной системы управления грузопотоками между фронтальным и тыловым терминалом.

Ввод в эксплуатацию тылового терминала имеет также негативные факторы. Так, при применении данной технологии возникают две основные проблемы: *технологическая* и *экономическая*.

Технологической проблемой является необходимость оперативного вывоза с фронтального терминала поступающих контейнеров, что, учитывая сезонное колебание грузопотока, обуславливает сложность в составлении графика подачи подвижного состава. Экономическая проблема

обусловлена необходимостью наличия дополнительного транспортного звена для перевозки контейнеров между фронтальным и тыловым терминалом. Снижение дополнительных затрат может быть достигнуто за счет увеличения пропускной способности сухопутного участка и, в том числе, оптимизации количества подвижного состава. Для реализации указанных проблем необходима разработка научно обоснованных методов оптимизации режима работы данного объекта инфраструктуры, которые могут учитывать условия выполнения перевозок.

Одним из способов решения проблемы оптимизации работы наземного звена является построение имитационной модели транспортного сообщения между фронтальным и тыловым терминалом. В исследовании такая модель была построена при помощи программного продукта «AnyLogic», который позволяет создавать модели с помощью набора активных элементов и поддерживает три известных метода моделирования:

– системная динамика;

– дискретно-событийное моделирование;

– агентное моделирование.

Деятельность транспортной системы представляется как хронологическая последовательность событий, поэтому моделирование такой системы можно отнести к дискретному. Одним из основных вопросов, возникающих при создании любой модели, является ее адекватность. Наибольшее влияние на эту характеристику оказывает качество исходных данных. Для создания имитационной модели в среде «AnyLogic» необходимо определить две основные характеристики, определяющие работу модели: закон распределения, отражающий поступление контейнеров (заявок) в систему, и их частоту.

В качестве исходных данных была взята генеральная совокупность, отражающая количество контейнеров, поступающих на АО «Первый контейнерный терминал» (г. Санкт-Петербург) в течение трех лет (на основании статистических наблюдений). Данный период времени был взят с целью отражения колебаний грузопотока в зависимости от сезонности, а также влияния экономических и геополитических факторов. Для определения закона распределения статистические данные были скорректированы с целью облегчения статистической обработки, при этом репрезентативность выборки не была снижена. Был построен статистический ряд распределения частоты поступления контейнеров в порт (табл. 1).

Таблица 1

Эмпирический ряд распределения частоты поступления контейнеров в порт

Величина x_i	Число наблюдений f_i	$x_i \cdot f_i$	Накопленная частота S	$\lvert x_i - x \rvert \cdot f_i$	$(x - \overline{x})^2 \cdot f_i$	Эмпирическая вероятность f_i/N
649	49	31801	49	7940,75	1286848,25	0,051
703	115	80845	164	12426,46	1342756,16	0,12
757	185	140045	349	10000,4	540583,29	0,19
811	255	206805	604	14,33	0,81	0,27
865	194	167810	798	10465,1	564527,29	0,2
919	120	110280	918	12953,26	1398223,9	0,12
973	43	41839	961	6963,58	1127709,28	0,0447
Итого	$\sum f_i = N = 1069$	779425		60763,88	6260648,97	1

Для оценки ряда распределения найдем следующие показатели [7] – [10].

Выборочная средняя:

$$\overline{x} = \frac{\sum x \cdot f}{\sum f};$$

$$\bar{x} = \frac{779425}{961} = 811{,}06\,.$$

Мода — наиболее часто встречающееся значение признака у единиц данной совокупности.

Максимальное значение повторений при $x = 811$ ($f = 255$). Следовательно, мода равна 811.

Медиана — значение признака, приходящееся на середину ранжированной (упорядоченной) совокупности.

Находим x_i, при котором накопленная частота S будет больше $\sum f/2 = 481$. Это значение $x_i = 811$. Таким образом, медиана равна 811.

Дисперсия характеризует меру разброса около ее среднего значения, т. е. меру рассеивания (отклонение от среднего).

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 f}{\sum f};$$

$$D = \frac{6260648{,}97}{961} = 6514{,}72.$$

Среднее квадратическое отклонение (средняя ошибка выборки):

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{6514{,}723} = 80{,}71.$$

Каждое значение ряда отличается от среднего значения 811,06 в среднем на 80,71.

Коэффициент вариации — мера относительного разброса значений совокупности, которая показывает, какую долю среднего значения этой величины составляет ее средний разброс.

Поскольку $v \leq 30$ %, то совокупность однородна, а вариация слабая. Полученным результатам можно доверять.

С использованием пакета прикладных программ статистика (STATISTICA) были получены эмпирические распределения и теоретические кривые вероятности частоты поступления контейнеров в порт (рис. 1).

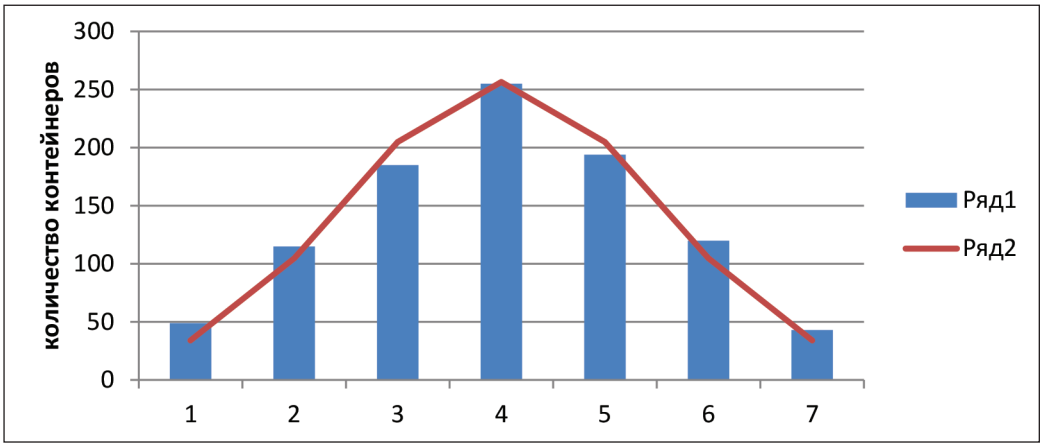


Рис. 1. Гистограмма эмпирического распределения и кривая нормального распределения при $\sigma = 80{,}71$, $\bar{x} = 811{,}06$

Характер статистического ряда, близость средней ошибки выборки, медианы и моды позволяют предположить, что распределение вероятностей частоты поступления контейнеров в порт может быть получено по нормальному закону. Также данное утверждение было проверено с использование критерия χ^2 (хи-квадрат) К. Пирсона. Величина χ^2 (хи-квадрат), характеризующая расхождения между эмпирическим и теоретическим распределениями, имеет вид

$$\chi^2 = \sum \frac{\left(n_i - n^*\right)^2}{n_i^*},$$

где n^*_i — теоретические частоты:

$$n_i^* = \frac{n \cdot h}{\sigma} \varphi_i .$$

Были определены теоретические частоты (табл. 2), учитывая, что n = 961, h = 54 (ширина интервала), σ = 80,71, $\overline{x}$ = 811,06.

Таблица 2

Теоретические частоты

Значения	x_i	u_i	φ_i	n_i^*
1	649	–2,01	0,0529	34,01
2	703	–1,34	0,1626	104,54
3	757	–0,67	0,3187	204,9
4	811	–0,000696	0,3989	256,47
5	865	0,67	0,3187	204,9
6	919	1,34	0,1626	104,54
7	973	2,01	0,0529	34,01

Далее было проведено сравнение эмпирических и теоретических частот и составлена расчетная табл. 3, из которой видно наблюдаемое значение критерия:

$$\chi^2 = \sum \frac{(n_i - n^*)^2}{n_i^*} .$$

Таблица 3

Сравнение эмпирических и теоретических частот

i	n_i	n_i^*	$n_i - n_i^*$	$(n_i - n_i^*)^2$	$\frac{(n_i - n_i^*)^2}{n_i^*}$
1	49	34,01	–14,99	224,66	6,61
2	115	104,54	–10,46	109,38	1,05
3	185	204,9	19,9	396,18	1,93
4	255	256,47	1,47	2,16	0,0084
5	194	204,9	10,9	118,91	0,58
6	120	104,54	–15,46	238,96	2,29
7	43	34,01	–8,99	80,79	2,38
∑	961	961			14,84

Далее была определена граница критической области. Так как статистика Пирсона измеряет разницу между эмпирическим и теоретическим распределениями, то чем больше ее наблюдаемое значение $K_{набл}$, тем сильнее довод против основной гипотезы. Поэтому критическая область для этой статистики всегда правосторонняя: ($K_{кр}$; +∞). Её граница $K_{кр} = \chi^2(k - r - 1; \alpha)$ была найдена по таблицам распределения χ^2 и заданным значениям σ, k = 7, r =2 (параметры $\overline{x}$ и σ оценены по выборке). $K_{кр}(0{,}005; 4) = 14{,}86026$; $K_{набл} = 14{,}84$. Наблюдаемое значение статистики Пирсона не попадает в критическую область: $K_{набл} < K_{кр}$, поэтому нет оснований отвергать основную гипотезу. Справедливым является предположение о том, что данные выборки имеют нормальное распределение.

Объектом моделирования был выбран грузопоток между АО «Первый контейнерный терминал» и терминалом, выполняющим функции тылового, АО «Логистика-Терминал» в пос. Шушары. В модели были заданы существующие условия выполнения перевозок между этими двумя объектами транспортной инфраструктуры с учетом применения технологии «блок-трейн», которая подразумевает наличие выделенной ветки графика движения поездов, сквозное прохождение

узловых станций и ускоренное формирование состава на железнодорожной станции. Алгоритм работы данной модели задается при помощи стандартизированных блоков и настраивается имеющимися настройками или при помощи языка JAVA (рис. 2 и 3).

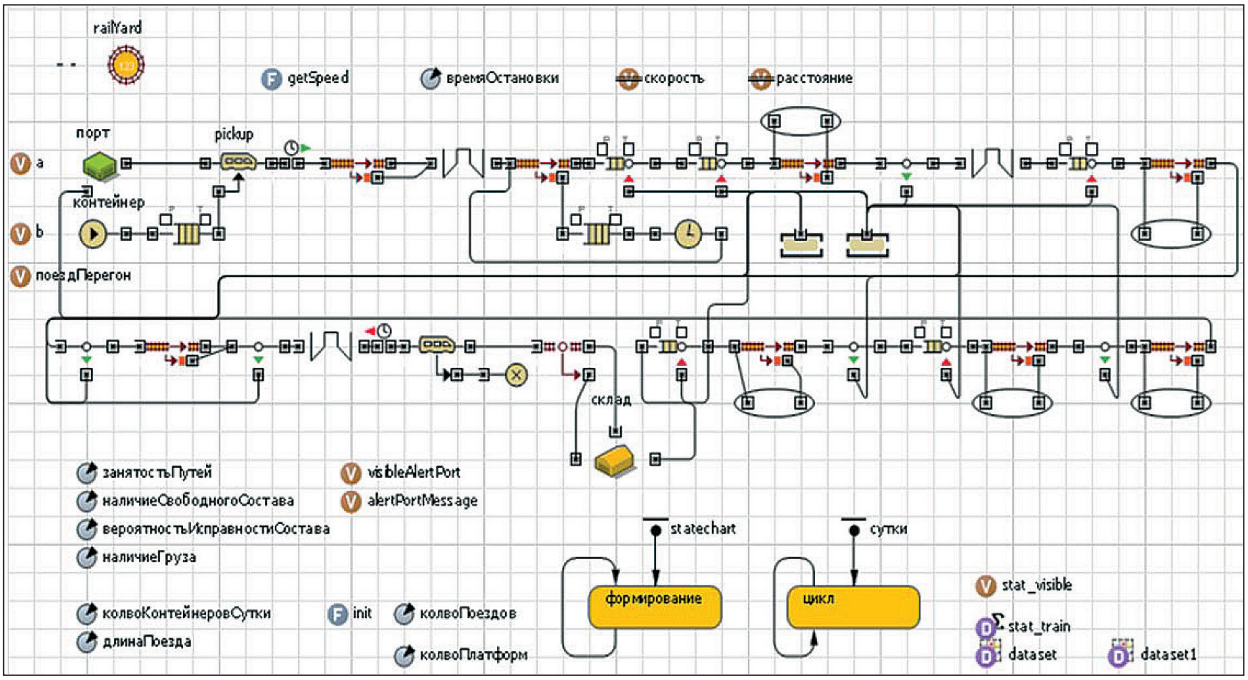


Рис. 2. Общий вид блок-схемы алгоритма модели

Так как единицей модельного времени является минута, для задания исходных данных необходимо определить частоту поступления заявок в систему за единицу модельного времени. Частота поступления заявок в систему: $\frac{1440}{811,06} = 1,77$. Помимо частоты и количества поступающих контейнеров также следует задать период времени, необходимый на погрузочно-разгрузочные операции, и задать вероятностные параметры занятости путей, наличия свободного подвижного состава, вероятность неисправности подвижного состава, вероятность отсутствия груза. Данные параметры были получены *методом экспертных оценок*.

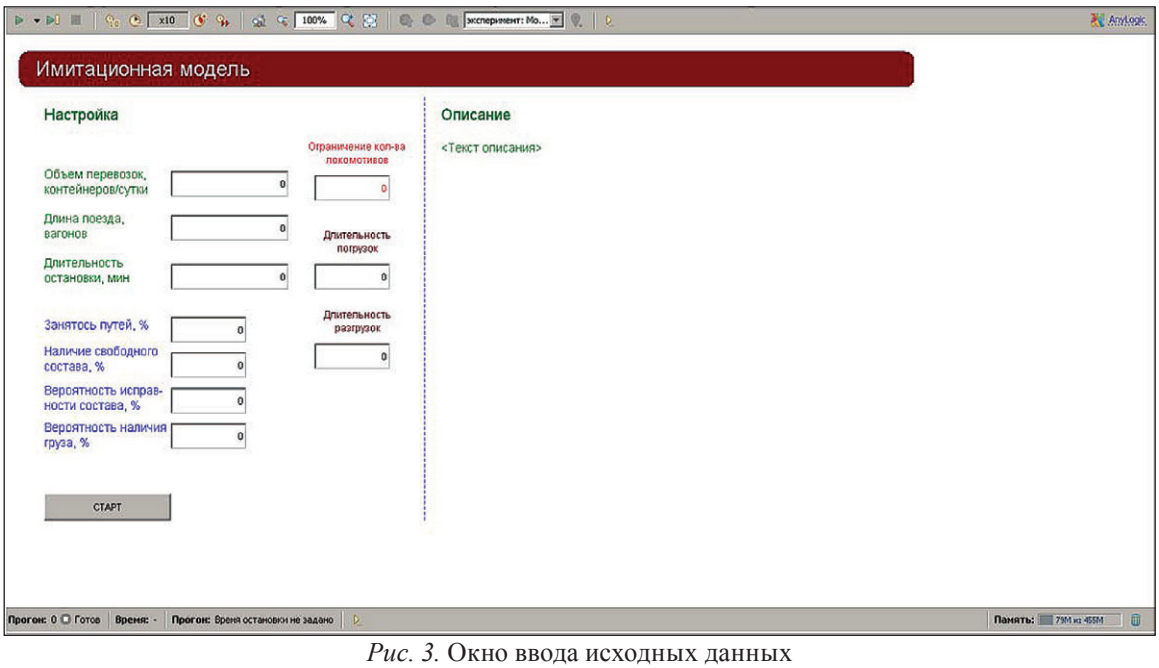


Рис. 3. Окно ввода исходных данных

В настоящем исследовании рассматривается движения ускоренного контейнерного поезда по технологии «блок-трейн». Продолжительность обработки поезда на ст. Автово без изменения веса и длины со сменой локомотива приведена в табл. 4.

Таблица 4

Обработка поезда без изменения веса и длины, со сменой локомотива

№ п/п.	Операция	Время, мин
1	Извещение работников СТЦ, ПТО ВЧДЭ-13, ФГП ВО, ДСПП 1 парка о номере, времени прибытия, пути приёма поезда	0
2	Выход на путь приёма работников, участвующих в обработке поезда для встречи «с ходу»	0
3	Закрепление состава, приём от машиниста пакета перевозочных документов	8
4	Отцепка поездного локомотива и выезд его с пути приёма	4
5	Заезд локомотива на путь и прицепка локомотива к составу	4
6	Ограждение состава ручными переносными сигналами	15
7	Зарядка тормозной магистрали поезда	13
8	Полное опробование тормозов состава от локомотива, дополнительные работы по устранению неисправностей, навешивание хвостовых сигналов, доклад о готовности	30
9	Приём под охрану вагонов с номенклатурными и опасными грузами	30
10	Снятие ограждения	15
11	Уборка средств закрепления состава	8
12	Вручение локомотивной бригаде пакета перевозочных документов, предупреждения, отправление	5
Общая продолжительность, мин		81

После ввода исходных данных запускается имитационная модель. Ускоренный режим работы позволяет осуществить проведение эксперимента в сжатые сроки.

Результаты моделирования

В результате проведения эксперимента в течение 31 календарного дня (рис. 4) были получены следующие данные: при определенном законе распределения и частоте поступления контейнеров в систему средняя пропускная способность данного логистического звена составляет 436 сорокафутовых контейнеров в сутки. Ее повышение возможно за счет изменения графика движения поездов, увеличения скорости движения и длины контейнерного поезда. Необходимое количество платформ для обслуживания данного количества контейнеров составляет 861 единицу.

Моделирование, т. е. замена реального объекта математическим, является незаменимым инструментом исследования, когда необходимо определить расчетные эксплуатационные характеристики объекта без возможности его физического испытания либо объем работ по подготовке объекта к испытаниям является чрезвычайно большим (испытание физической модели сложного технологического объекта инфраструктуры, такого как контейнерный терминал, а тем более использование совокупности транспортно-логистических объектов инфраструктуры не представляются возможными).

Замена такого объекта его компьютерной моделью, учитывающей как макрофакторы (сезонность, вектор мировой экономики), так и локальные факторы, в том числе такие, как плановые ремонтные работы подвижного состава, позволяет прогнозировать режим работы транспортного узла, проводить оптимизацию временных и экономических факторов, а также моделировать системы, предотвращающие аварийные ситуации.

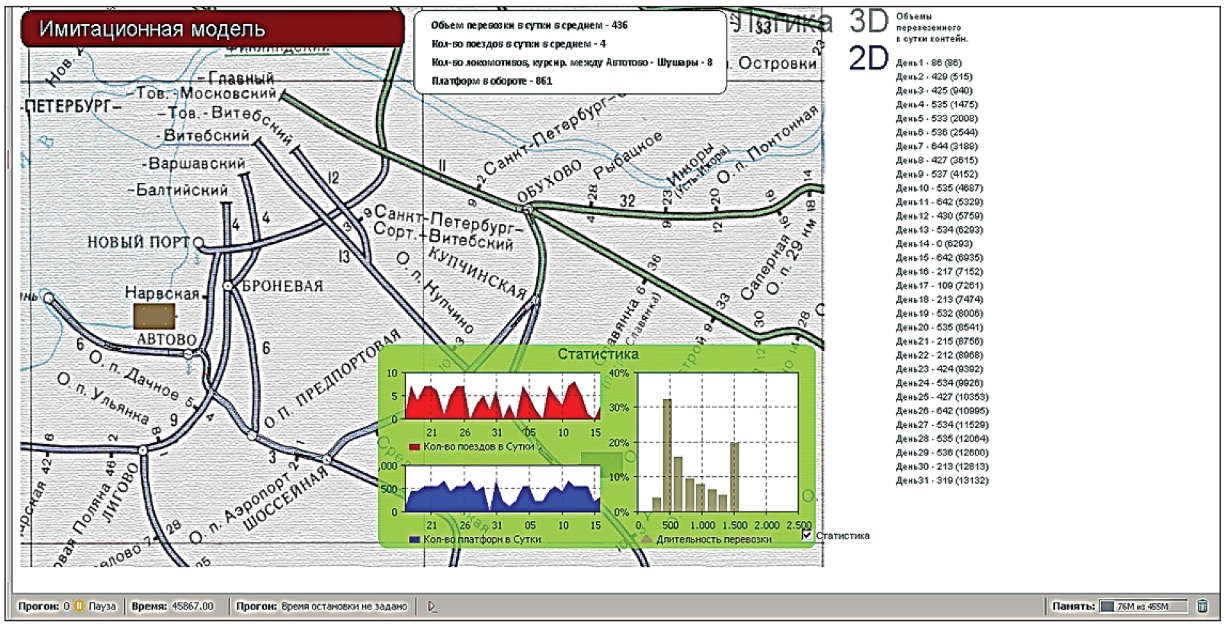


Рис. 4. Экранная форма вычислительного эксперимента

Отдельным, имеющим прикладную значимость результатом моделирования, является возможность определения минимально необходимого (достаточного) числа единиц привлекаемого железнодорожного подвижного состава, что существенно минимизирует расходы, обусловленные наличием дополнительного транспортного звена в системе «сухой порт».

Список литературы

1. *Кузнецов А. Л.* Технология работы порта: учеб. пособие / А. Л. Кузнецов, О. А. Изотов, А. В. Кириченко; под общ. ред. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 184 с.

2. *Levinson M.* The Box: How the Shipping Container Made the World Smaller and the World Economy Bigger / M. Levinson. — Princeton University, 2006. — 400 p.

3. *Щербакова-Слюсаренко В. Н.* Концепция сухих портов в мире и в Российской Федерации. — В кн.: Системный анализ и логистика на транспорте / В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Материалы 2-й Межвузовской науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 76–89.

4. *Боровикова М. С.* Организация движения на железнодорожном транспорте / М. С. Боровикова. — М.: Изд-во «Маршрут», 2003. — 368 с.

5. *Горынцев М. Н.* Имитационное моделирование порта Тамань. — В кн.: Системный анализ и логистика на транспорте / М. Н. Горынцев // Материалы 2-й Межвузовской науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 35–43.

6. *Панова Ю. Н.* Обоснование этапности развития тыловых контейнерных терминалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / Ю. Н. Панова. — СПб.: ПГУПС, 2012. — 148 с.

7. *Ковалев Р. В.* Введение в моделирование динамики механических систем [Электронный ресурс] / Р. В. Ковалев, Д. В. Даниленко // САПР и графика. URL: Режим доступа: http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=18949 (Дата обращения 20.07.2015).

8. *Максимов Ю. Д.* Математическая статистика, опорный конспект / Ю. Д. Максимов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. — 97 с.

9. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. — 9-е изд. — М.: Высш. шк., 2003. — 479 с.

10. *Новицкий П. В.* Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 304 с.

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

УДК 656.61.052, 629.5.073.5

Н.Д. Крюков,
асп.

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СУДОВ ПРИ ПЛАВАНИИ В УСЛОВИЯХ ТРОПИЧЕСКИХ ШТОРМОВ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

RECOMMENDATIONS FOR VESSELS WHEN NAVIGATION IN A TROPICAL STORMS OF THE NORTHEN ATLANTIC

Рассмотрены основные неблагоприятные гидрометеорологические факторы, воздействующие на судно при плавании в штормовых условиях. Представлены статистические данные о тропических циклонах, образовавшихся в Атлантическом океане за период с 1851 по 2014 гг. Определена тенденция увеличения количества штормовых дней в Атлантике и, как следствие этого, сделан вывод об учащении случаев плавания судов в условиях тропического шторма. Описан резонанс качки как наиболее неблагоприятное, с точки зрения безопасности, влияние штормового волнения на судно. Показаны различные типы резонансных диаграмм как средство предотвращения резонанса качки или выхода из него. Рассчитаны примеры индивидуальных резонансных диаграмм для судов с различными периодами собственных продольных колебаний и сделаны выводы о возможности попадания их в резонанс. Сформулированы основные рекомендации для судов, совершающих переход в зоне потенциального влияния тропического циклона.

Main adverse hydrometeorological factors influenced on vessel crossing of zone of tropical cyclone are examined. Statistic data tropical cyclones generated in Atlantic Ocean during period from 1851 to 2014 are presented. Tendency of increasing of storm days in Atlantic Ocean is determined and as a result of it the conclusion about increasing of sailing in tropical storm is made. Resonance like more adverse influence of storm on vessel from safety point of view is described. Different types of resonance diagrams are described. Examples personal resonance diagrams for different vessels are computed, conclusions about possibility resonance are drew. Main recommendations for vessel crossing zone of potential influence of tropical cyclone are formulated.

Ключевые слова: тропический шторм, резонанс, резонансные диаграммы, опасные гидрометеорологические явления.

Key words: tropical storm, resonance, resonance diagram, hydrometeorological hazard.

СУДА, совершающие трансокеанские переходы, подвергаются непрерывному воздействию неблагоприятных гидрометеорологических факторов. Некоторые из них затрудняют плавание, приводя к увеличению времени перехода [1], другие представляют серьёзную угрозу безопасности как для судна и груза, так и для экипажа. Морская практика показывает, что на судах любого класса и тоннажа может произойти авария или гибель при воздействии на них особо опасных гидрометеорологических явлений, к которым относятся тропические циклоны, так как они сопровождаются сильным ветром, вплоть до ураганного, высокими волнами, а радиус самого тропического циклона может достигать 600 миль.

Для современных судов влияние ветра не столь критично, как было ранее, в эпоху парусного флота. В условиях шторма основное негативное влияние, оказывающее существенное воздействие на безопасность судна, имеет не ветер, а генерируемые им волны. Ветровое волнение является одним из основных гидрометеорологических факторов, определяющих безопасность и экономическую эффективность мореплавания. Набегающая на судно волна вызывает качку, при которой возможен опасный крен, смещение груза, заливание палубы с повреждением люковых закрытий, повреждение рулей, заливание ходового мостика, влияние на работу судового и навигационного оборудования. Наиболее неблагоприятный, а иногда и опасный характер качка приобретает в условиях резонанса, при котором может произойти опрокидывание судна или его перелом. В целях обеспечения безопасности судоходства судоводителям рекомендуется избегать встречи с тропическими циклонами, используя стандартные хорошо известные морякам схемы маневрирования

судна в зоне тропического циклона [2]. Однако данные схемы не всегда могут применяться, и по тем или иным причинам судно вынуждено двигаться в штормовых условиях, соответственно, оно будет подвержено определённому риску, но при соблюдении некоторых правил данные риски можно минимизировать, снизив возможность образования резонанса, и провести штормовое плавание в сравнительно безопасных условиях.

Современные исследования возможности плавания судов в штормовых условиях в подавляющем большинстве сводятся либо к описанию катастроф, случившихся на море и вызванных негативным воздействием штормовых условий [3], либо к экспериментальной и аналитической работе, связанной с разработкой новых принципов для строительства более безопасных судов [4] – [6]. Лишь немногие работы предоставляют судоводителю конкретные практические рекомендации относительно того, как при незначительном отклонении от расчётного курса или при изменении скорости обеспечить приемлемый уровень безопасности при следовании через зону жестоких штормов и ураганов [7], [8].

Тропические циклоны (ТЦ) относятся к наиболее опасным гидрометеорологическим явлениям на море [9], приводящим к аварийным ситуациям и катастрофам. Они представляют собой область низкого атмосферного давления диаметром от 100 до 600 миль и скоростью перемещения от 70 до 240 миль в сутки. Зарождаясь в низких широтах, они движутся в область субтропических и умеренных широт. ТЦ имеют ряд отличий от циклонов умеренных широт. Одной из таких особенностей является наличие в центре циклона зоны почти безоблачной погоды, где скорость ветра, как правило, находится в пределах 0 – 10 уз. Данная зона имеет название *глаз бури*. При удалении от центра циклона на границе *глаза бури* наблюдается резкое увеличение скорости ветра, достигающее максимальное значение на некотором удалении от центра циклона. При удалении от центра к периферии циклона скорость ветра уменьшается. Другой важной чертой *глаза бури* является образование в её зоне крайне неблагоприятного волнения — толчеи, обладающей крутыми склонами и неравномерным периодом. Также в зоне ТЦ наблюдается выпадение большого количества осадков, приводящее к значительному снижению видимости, что, в свою очередь, осложняет навигацию. Наиболее существенной для навигации отличительной чертой ТЦ являются большие градиенты давления, вызывающие ураганные ветры, достигающие 80 – 120 уз, а в отдельных случаях 150 – 200 уз [2]. Генерируемые этими ветрами волны могут достигать высоты более 20 м [10].

Покидая зону влияния ТЦ, эти волны превращаются в зыбь, распространяющуюся на значительные расстояния во всех направлениях. Наиболее существенные, с точки зрения размеров, волны образуются под действием ветра, мало изменяющего направление в течение длительного периода времени, в правом тыловом квадранте, так как движутся в том же направлении, что и ТЦ. В дальнейшем эти волны образуют наиболее значительную зыбь.

На рис. 1 приведена схема распространения волн и зыби в ТЦ Кембриджского исследовательского центра ВВС США, представленная в монографии *G. Riehl. Tropical meteorology*: *Mc Graw Hill. — New York, 1954. — 392 p.*, где приняты следующие обозначения: тип *A* — наиболее крупная зыбь, находящаяся перед циклоном, а также в правом тыловом квадранте, которая распространяется по направлению движения циклона; тип *B* — волны и зыбь средней длины и высоты, находящиеся во фронтовых квадрантах, которые движутся влево или вправо от вектора движения циклона; тип *C* — волны и зыбь меньшей длины и высоты, чем характерные для типа *B*, находятся в тыловых квадрантах и движутся влево и вправо от вектора движения циклона; тип *D* — зыбь и волны, наименьшей длины и высоты, которые находятся в тыловом квадранте и движутся в направлении, противоположном вектору движения циклона.

В течение длительного периода времени, из-за недостаточной густоты наблюдательной сети, многие ТЦ проходили над океанами незамеченными, за исключением Атлантики, где судоходство существует уже многие годы и имеется большое количество островных метеостанций. Для систематизации ТЦ, образующихся в северной Атлантике, принята шкала ураганов Саффира — Симсона, классификация которой приведена в таблице (с. 33).

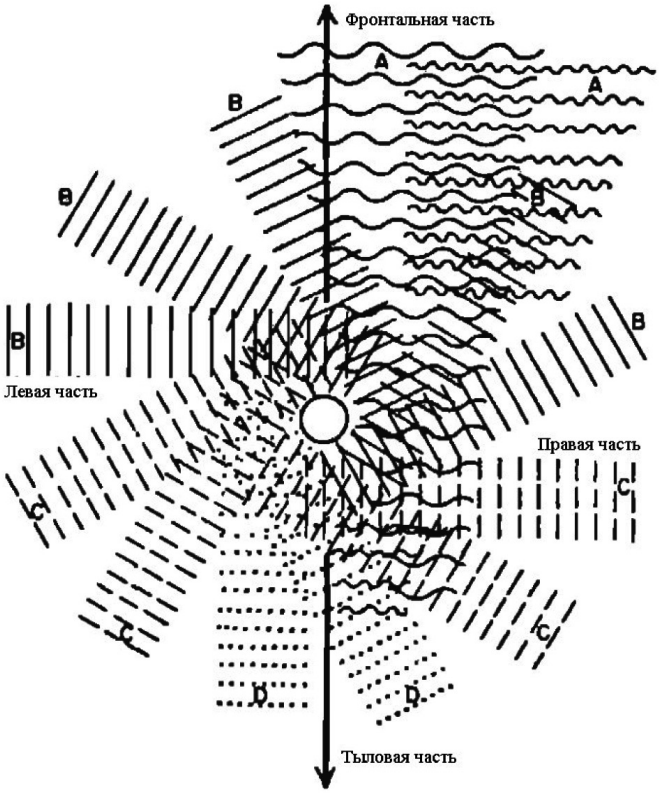


Рис. 1. Схема распространения типов волн и зыби в тропическом циклоне

Классификация ТЦ Северной Атлантики

Тип	Категория	Давление, мбар	Скорость ветра, уз
Депрессия	*td*	–	< 34
Тропический шторм	*TS*	–	34 – 63
Ураган	1	> 980	64 – 82
	2	965 – 980	83 – 95
	3	945 – 965	96 – 112
	4	920 – 945	113 – 135
	5	< 920	> 135

Сбор статистических данных ТЦ в Северной Атлантике насчитывает более 160 лет. Эти данные представлены в открытом доступе на интернет-ресурсе http://weather.unisys.com/. Проведена их статистическая обработка. В период с 1851 по 2014 гг. образовалось 1518 тропических циклонов, общая продолжительность штормовых дней за это время составила 12742. Определено количество штормовых дней в каждом месяце (рис. 2). На рисунке 2 хорошо видно, что наибольшая вероятность образования ТЦ выпадает на сентябрь, хотя вероятность их появления в августе и сентябре также велика.

Образование двух и более ТЦ в месяц часто связано с наличием групповых возмущений, другими словами, последовательностью ТЦ, возникающих почти в одном и том же месте с интервалом в несколько суток. В период с августа по сентябрь образуется более 80 % всех ТЦ, из них на сентябрь выпадет более 38 %.

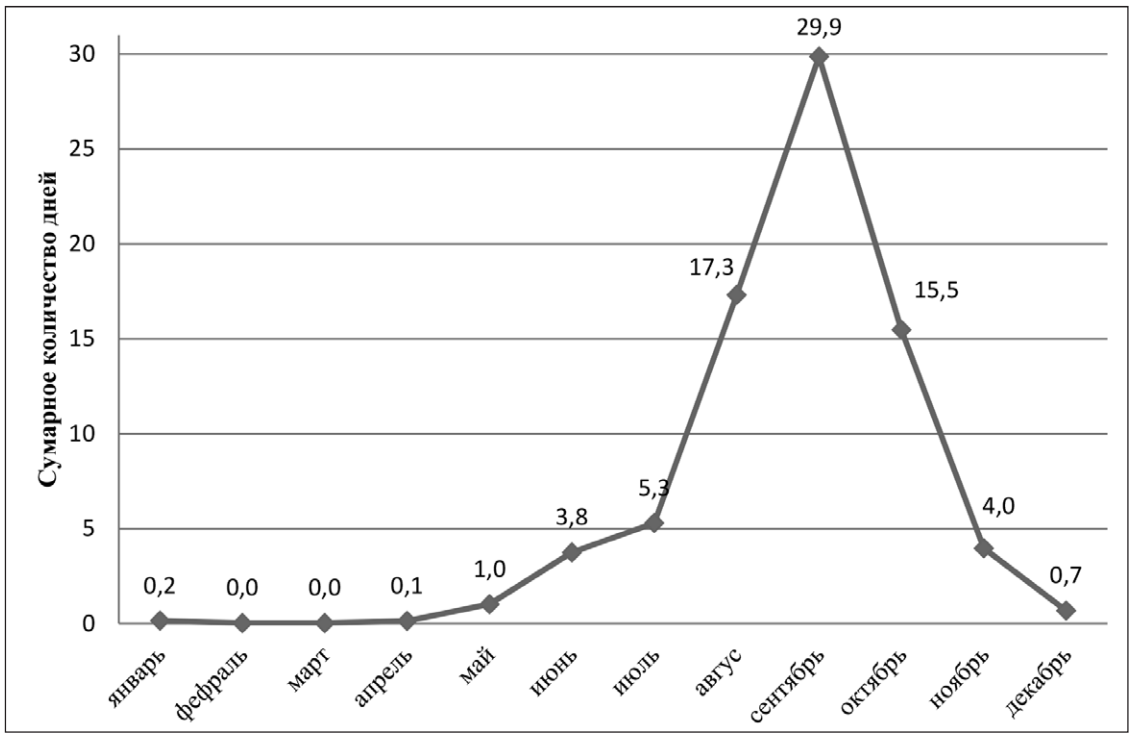


Рис. 2. Количество штормовых дней в северной Атлантике для каждого месяца

На рис. 3 показано количество дней ТЦ за 10-летний период. На графике хорошо видно, что общая тенденция имеет положительные значения, и количество штормовых дней растёт. Экстраполируя полученные данные, можно предположить, что количество ТЦ в Северной Атлантике будет продолжать расти. Следовательно, и количество случаев, когда по тем или иным причинам судоводитель не сможет или не захочет проводить маневр по расхождению с ТЦ, также будет увеличиваться и для обеспечения относительно безопасного и благоприятного прохождения зоны ТЦ ему необходимо наличие точной информации том, как и где движется циклон, а также характеристики волнения в данной зоне [11].

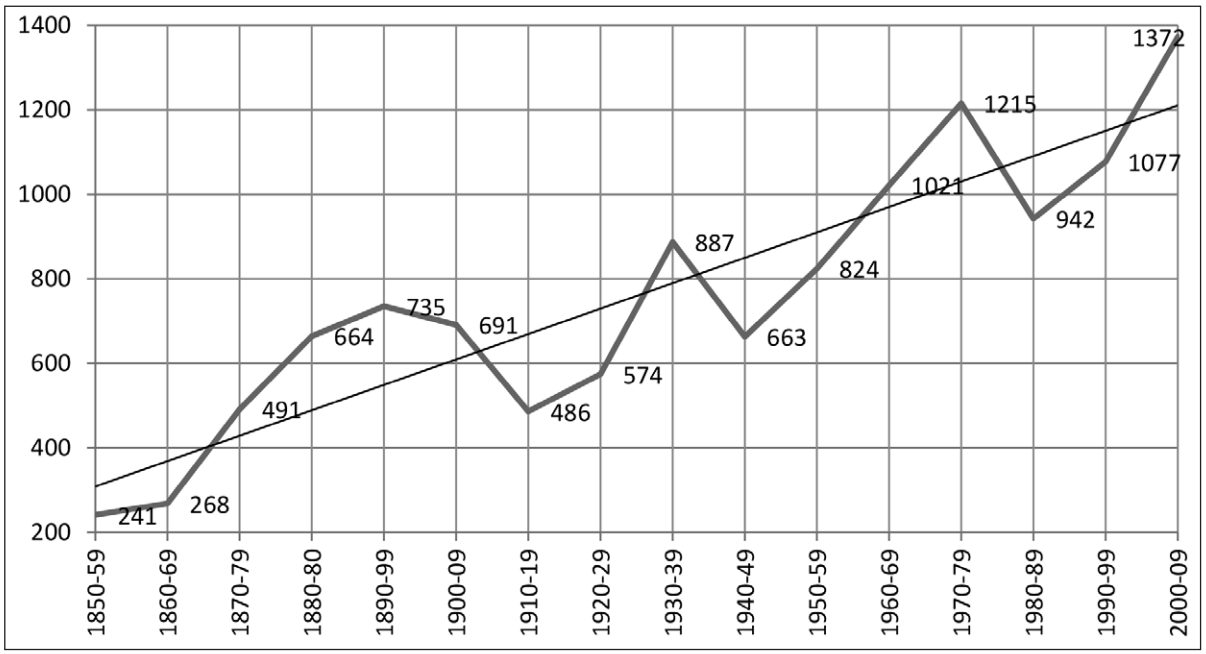


Рис. 3. График изменения количества штормовых дней в десятилетний период

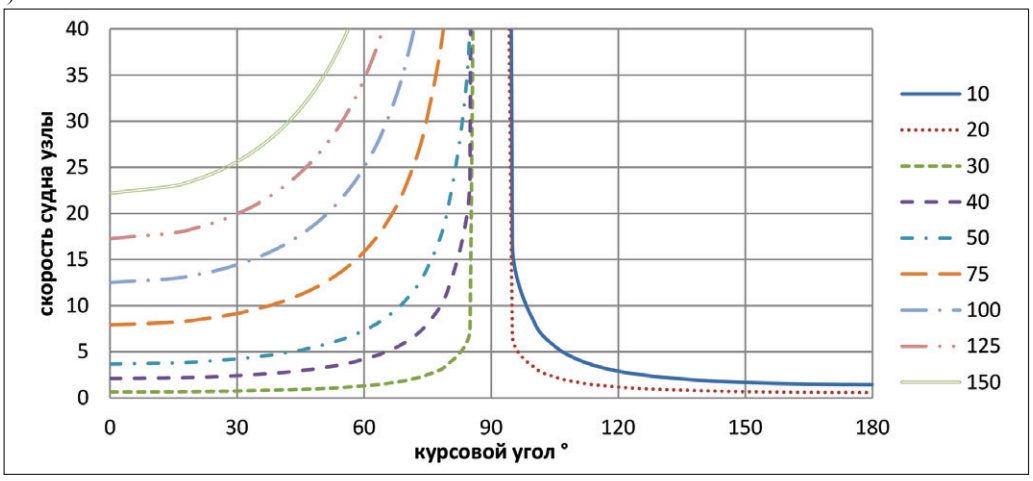
Под резонансом следует понимать совпадение периода собственных колебаний судна с кажущимся периодом волны. Кажущийся период волны определяется с движущегося судна и равен среднему интервалу времени прохода гребней волны через визир пеленгатора. При условии, что кажущийся период волны оказывается равным периоду собственных поперечных колебаний судна, будет наблюдаться резонанс бортовой качки. Резонанс килевой качки будет наблюдаться при совпадении периода собственных продольных колебаний с кажущимся периодом волны. Для предупреждения резонанса судоводителю следует выбрать оптимальные курс и скорость в зависимости от параметров волнения, так как при изменении курса или скорости судна можно добиться значительного отличия кажущегося периода волн и собственных колебаний судна.

Для более точного определения того, какие навигационные параметры и как именно судоводителю следует изменить, чтобы провести штормование в сравнительно безопасных и благоприятных условиях, в течение длительного времени применялась диаграмма, разработанная Ю. В. Ремизом в Николаевском кораблестроительном институте (ныне Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова). По этой диаграмме можно определить наступление явления резонанса по одному из четырёх параметров: высоте волны, силе волнения в баллах, кажущемуся периоду и длине волны. Однако более удобно и быстро можно решать вопрос об образования резонанса, рассчитав индивидуальные для каждого судна диаграммы для различных длин волн и неблагоприятного сочетания скорости судна и курсового угла. Расчёт индивидуальных резонансных диаграмм легко проводить по формуле кажущегося периода волны [7]:

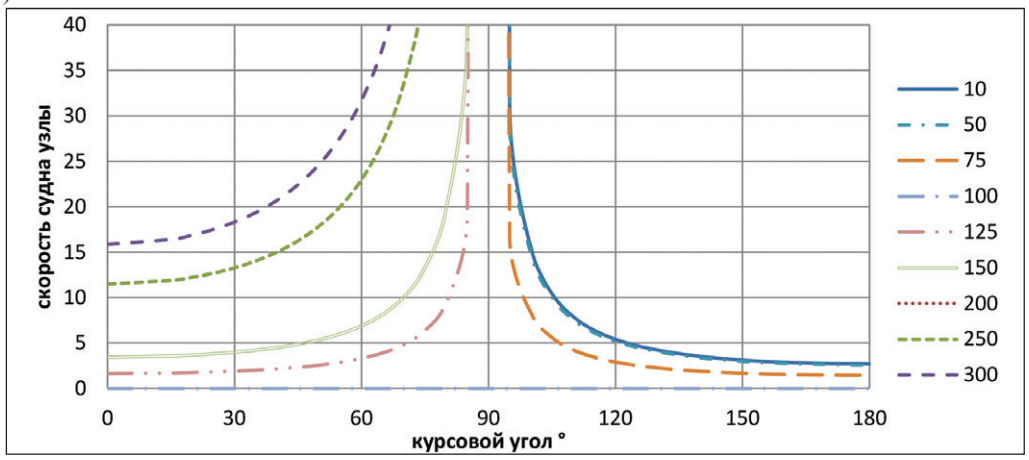
$$V\cos\alpha = \frac{\lambda}{\tau_к} - c = \frac{\lambda}{\tau_к} - 1{,}25\sqrt{\lambda}\,, \qquad (1)$$

где V — скорость судна; α — курсовой угол; λ — длина волны; c — скорость волны; $\tau_к$ — период собственных колебаний. Примеры таких диаграмм приведены на рис. 4.

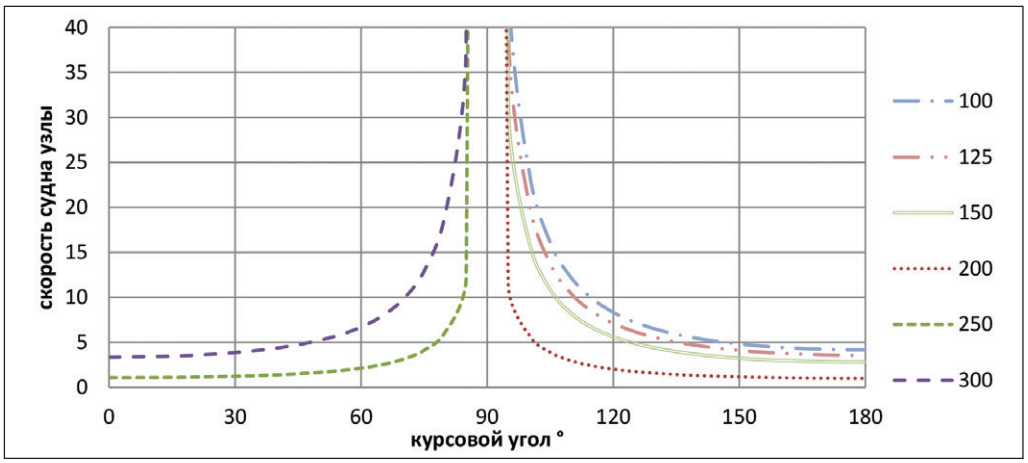
а)



б)



в)



г)

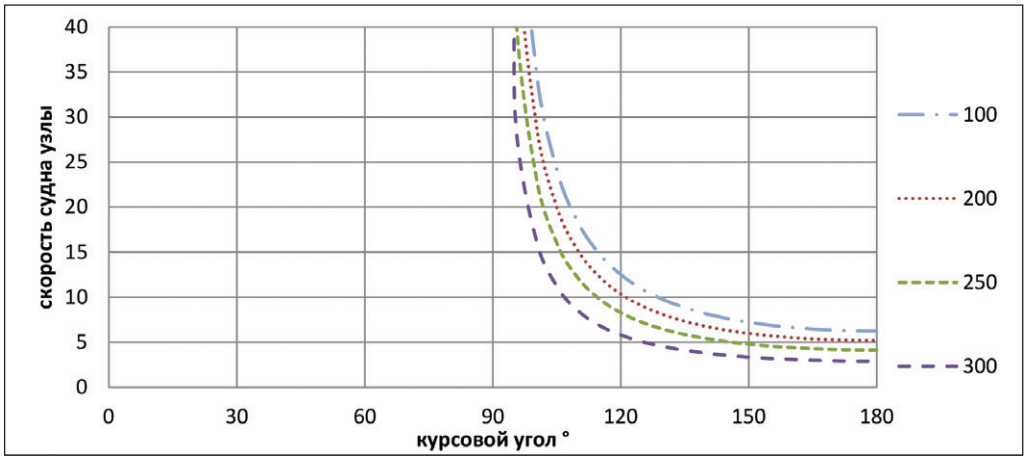


Рис. 4. Резонансная диаграмма для периода собственных колебаний:
а — $\tau_к$ = 4 с; *б* — $\tau_к$ = 8 с; *в* — $\tau_к$ = 12 с; *г* — $\tau_к$ = 16 с

На рис. 4 по оси *OX* расположены значения курсового угла, по оси *OY* указана скорость судна. Графики построены для длин волн от 50 до 250 м и периодов резонансной качки 4, 8, 12 и 16 с соответственно. Площадь, заключённая между этими графиками, соответствует зоне резонанса. Проанализировав представленные диаграммы рис. 4, легко прийти к следующим выводам:

– чем больше период собственных колебаний судна, тем сложнее ему попасть в резонанс;

– изменение скорости или курсового угла у больших судов приводит к более быстрому их выходу из резонанса, в отличие от судов, обладающих меньшими размерениями;

– суда, обладающие высокой скоростью, также имеют меньше шансов попасть в условие резонанса.

При использовании всех типов резонансных диаграмм необходимо знать период собственных продольных, поперечных и вертикальных колебаний судна. Данные параметры достаточно хорошо изучены и легко находятся по общеизвестным формулам.

Так, период собственных поперечных колебаний судна (бортовая качка) $\tau_{борт}$ вычисляется по «капитанской формуле»:

$$\tau_{борт} = \frac{fB}{\sqrt{h_м}}, \qquad (2)$$

где B — ширина судна, м; f — коэффициент, принятый для морских транспортных судов, равным 0,75 до 0,9 в зависимости от типа; $h_м$ — начальная поперечная метацентрическая высота, м. При этом величина периода измеряется в секундах.

Помимо опасностей, существующих при резонансе бортовой качки, следует отметить также опасность резонанса при килевой качке. Попутные волны в открытом море движутся со скоростью большей, чем скорость большинства современных судов. Более того, зачастую современные суда имеют длину, схожую с длиной волны, образующейся в ТЦ. В результате при обтекании пера руля попутным потоком гребня волны даже при небольшом угле атаки возникает пара сил, которые стремятся развернуть судно лагом к волне, что приводит к резкому снижению управляемости судна и его устойчивости на курсе. При неблагоприятном стечении обстоятельств, после разворота судна лагом к волне, оно сразу может войти в резонанс бортовой качки и перевернуться. При курсовом угле к волнению, близком к 180°, в случае равенства собственных продольных колебаний судна и кажущегося периода волны, резко возрастают нагрузки, вызывающие общий изгиб судна, что, в свою очередь, может привести к нарушению общей прочности корпуса судна и, как следствие, к его разлому.

Период собственных продольных колебаний судна $\tau_{кил}$ (килевая качка) рассчитывается по формуле

$$\tau_{кил} = \frac{B}{\sqrt{T_м}}, \qquad (3)$$

где $T_м$ — средняя осадка судна, м.

Выводы

Основываясь на представленных статистических данных об изменении количества ТЦ в Атлантическом океане, выдвинуто предположение об учащении случаев встречи их судами, совершающими трансокеанские переходы. Для обеспечения безопасности мореплавания в условиях частых ТЦ, когда по тем или иным причинам судно не может или не хочет применять стандартные схемы расхождения с ТЦ и вынуждено совершать переход в тяжёлых гидрометеорологических условиях, судоводителю следует руководствоваться следующими рекомендациями. Для относительно безопасного следования через зону ТЦ штурману следует точно представлять основные навигационные характеристики ТЦ, а также иметь достоверный прогноз об их изменениях и направлении перемещения циклона. Это необходимо для предотвращения прохождения судна через зону центра ТЦ, где, как отмечалось ранее, наблюдается наиболее опасное, с точки зрения навигации, волнение. Также следует избегать соотношения «курс-скорость», при котором возможно образование резонанса. Для этого судоводителю, совершающему переход в зоне потенциального влияния ТЦ, следует иметь на борту индивидуальную судовую резонансную диаграмму. Грамотная обработка оперативных гидрометеорологических данных с применением резонансных диаграмм позволит ему найти наивыгоднейший трансокеанский путь перехода, в том числе в условиях ТЦ.

Список литературы

1. *Крюков Н. Д.* Учёт течений, генерируемых ветром, при плавании судов / Н. Д. Крюков, В. А. Шматков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 23–29.

2. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / под ред. Е. С. Нестерова. — М.: Росгидромет, 2013. — 295 с.

3. *Бондарь В. М.* Об одной версии гибели судна, загруженного упруго смещающимся грузом: сб. науч. тр. / В. М. Бондарь, В. Г. Сизов. — Киев: Нац. ун-т кораблестроения, 2007. — № 6. — С. 10–16.

4. *Храмушин В. Н.* Концептуальные проекты рыболовных, спасательных и патрульных судов для Сахалина и Курильских островов / В. Н. Храмушин // Мореходство и морские науки – 2011: избр. докл.

Третьей Сахалинской региональной морской науч.-техн. конф.; под общ. ред. В. Н. Храмушина. — Южно-Сахалинск: Сахалинский гос. ун-т, 2011. — С. 64–81.

5. *Суров О. Э.* Методика проектирования формы корпуса судна с учётом продольной качки и волновых изгибающих моментов / О. Э. Суров, П. П. Карпов // Морские интеллектуальные технологии. — 2013. — № 2. — С. 49–55.

6. *Храмушин В. Н.* Согласование элементов формы корпуса и общекорабельной архитектуры для достижения эффективности и безопасности штормового плавания / В. Н. Храмушин // Морские интеллектуальные технологии. — 2010. — Спецвыпуск. — С. 55–61.

7. *Умрихин В. П.* Программное обеспечение для решения задачи выхода судна из зоны резонансной качки / В. П. Умрихин, С. В. Петровский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. — № 1. — С. 107–109.

8. *Антоненко С. В.* Динамика корабля в штормовом море и нормы остойчивости / С. В. Антоненко, Н. И. Восковщук // Мореходство и морские науки. — 2011: избр. докл. Третьей Сахалинской региональной морской науч.-техн. конф.; под общей ред. В. Н. Храмушина. — Южно-Сахалинск: Сахалинский гос. ун-т, 2011. — С. 24–33.

9. *Бармин А. Н.* Классификация опасных природных явлений / А. Н. Бармин, Е. А. Колчин, Н. С. Шуваев // IX Межрегиональная науч.-практ. конф. студ. и асп., 10 апр. 2009 г.: в 3 т. / НФИ ГОУ ВПО «Кемеровский гос. ун-т»; под общ. ред. Ф. И. Иванова, С. А. Шипилова, Л. А. Проскуряковой, М. Р. Геты. — Новокузнецк, 2009. — Т. 1. — С. 70–72.

10. *Stewart R.* Introductionto Physical Oceanography / R. Stewart. — Texas: Department of Oceanography Texas A&M University. — 2008. — P. 353.

11. *Мастрюков С. И.* Гидрометеорологическое обеспечение безопасности общего мореплавания / С. И. Мастрюков // Навигация и гидрография. — 2009. — № 28. — С. 124–134.

УДК 655.62.052.4

А. А. Ершов,
д-р техн. наук, доц.;

Д. А. Хухарев,
инж.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОГО ЗАХОДА СУДНА В ПОРТ

CONDITIONS FOR SAFE ENTRY OF SHIPS IN PORT

В статье рассматривается расчетный способ определения безопасных условий с использованием определения безопасной ширины канала для прохода конкретного судна. Он включает в себя расчет гидродинамических и аэродинамических характеристик судна с учетом его конкретных особенностей, а также проверку его возможности двигаться по каналу определённой ширины в условиях конкретного ветра. Использование предлагаемого метода позволяет учесть влияние судов и других объектов, находящихся возле причала, а также влияние глубины и стенок канала на движение судна. В случае использования данного метода может учитываться возможность столкновения проходящего судна с другими объектами на канале во время движения. Предлагаемый метод может использоваться администрациями портов для оценки безопасности захода конкретного судна в порт, в частности при автоматизации решения подобных задач.

In the article considers the method of determining a current safe condition using the definition of safety channel width for the passage of a specific vessel. It includes the calculation of hydrodynamic and aerodynamic characteristics of the vessel, taking into account its specific characteristics, test its ability to move in a certain channel width in a particular wind. Using the proposed method allows to take into account the impact of vessels and other objects that are near the pier, and the influence of the depth and the channel walls on the movement of the ship. With this method may take into account the possibility of vessel collisions with other objects on the channel

during movement. The proposed method can be used by port authorities for the safety assessment of a specific ship entering the port. This approach can be used to automate such tasks.

Ключевые слова: рассчитанные условия безопасности, повышение безопасности заходов в российских портах.

Key words: a specially designed safety conditions, improving the safety of navigation in the Russian ports.

АНАЛИЗ аварийных ситуаций, произошедших с судами в российских и иностранных портах, показывает, что многие из них явились результатом навалов на суда, стоящие возле причалов. При этом заходящее судно двигалось по ограниченным по глубине и ширине каналам и фарватерам порта в условиях ветра. Таким образом, в случае аварии при проходе по каналам и фарватерам порта заходящее судно не «уложилось» в отведенную ему безопасную ширину канала или фарватера [1], [2]. Подобные задачи решались в работах [3] – [7] и др. Для оценки безопасности движения судна по каналам и фарватерам с учетом стоящих у причалов судов будем использовать текущую безопасную ширину канала или фарватера, безопасную для прохода судна (рис. 1). Аналогичный подход был использован в работе [8]:

$$Ш_б(t) = |K_2(t) - K_1(t)|, \quad (1)$$

где $Ш_б(t)$ — текущая безопасная ширина канала для прохода заходящего судна, м; $K_2(t)$ — текущая координата конечной (второй) безопасной кромки канала в направлении перпендикулярном движению судна, м; $K_1(t)$ — текущая координата начальной (первой) безопасной кромки канала в направлении, перпендикулярном движению судна, м.

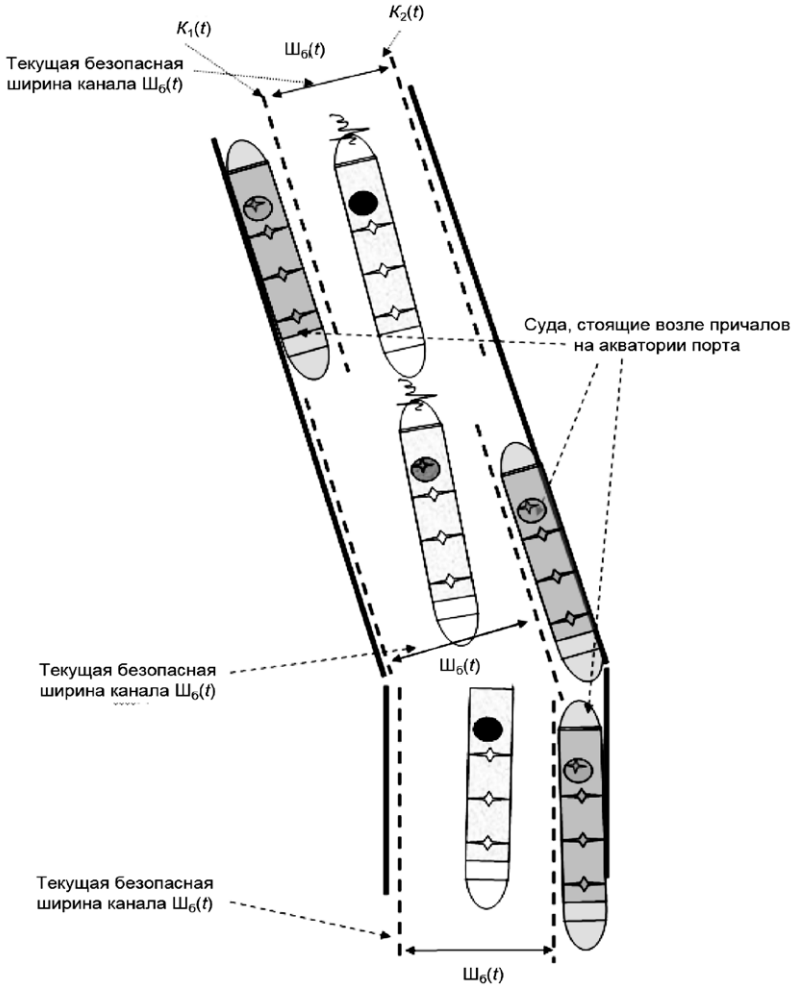


Рис. 1. Схема определения текущей безопасной ширины канала $Ш_б(t)$ для прохода заходящего судна

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, уравнения сил и моментов, действующих на судно при равномерном движении по мелководному и ограниченному по ширине (с учетом стоящих возле причала судов) каналу (см. рис. 1), могут быть записаны в виде:

$$\begin{cases} Y\beta_{\text{мк}}(t) - Y_a(t) - Y_r(t) = 0; \\ M\beta_{\text{мк}}(t) + M_a(t) - Y_r(t) l_{rm} = 0, \end{cases} \tag{2}$$

где $Y_r(t)$ — текущая боковая сила на руле судна, кн; $Y\beta_{\text{мк}}(t)$ — текущая проекция гидродинамической силы на ось Y с учетом влияния мелководья и эффекта канала, кН; $Y_a(t)$ — текущая проекция аэродинамической силы на ось Y, кН; $Y_r(t)$ — текущая проекция боковой силы на руле на ось Y, кН; l_{rm} — отстояние баллера руля от центра тяжести (ЦТ) судна, кН; $M\beta_{\text{мк}}(t)$ и $M_a(t)$ — текущие моменты гидро- и аэродинамических сил (момент гидродинамических сил рассчитывается с учетом влияния мелководья и эффекта канала), кН·м.

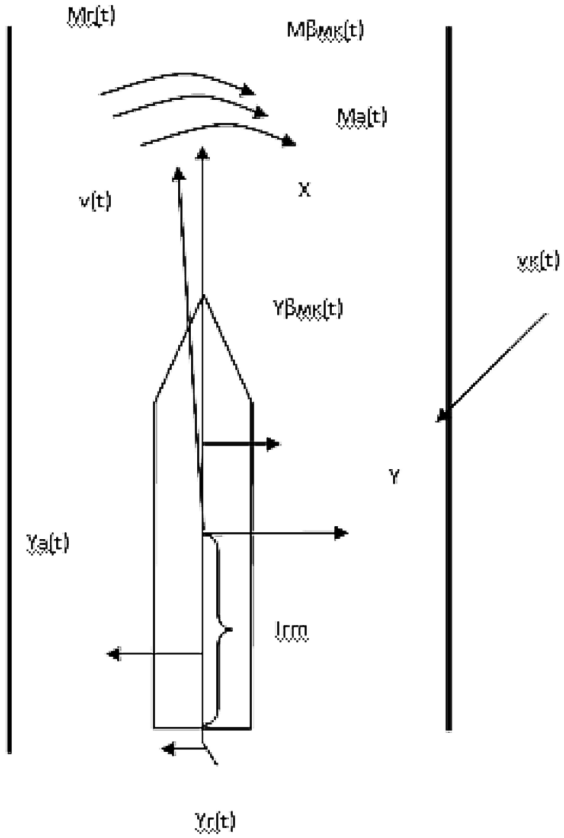


Рис. 2. Схема расчета сил и моментов движения судна на канале или фарватере

Выражая Y_r из первого уравнения системы (2) и подставляя его значение во второе уравнение, получим:

$$\begin{cases} Y\beta_{\text{мк}}(t) - Y_a(t) = Y_r(t); \\ M\beta_{\text{мк}}(t) + \left(Y\beta_{\text{мк}}(t) - Y_a(t)\right) l_{rm} + M_a(t) = 0, \end{cases} \tag{3}$$

или

$$\begin{cases} Y\beta_{\text{мк}}(t) - Y_a(t) = Y_r(t); \\ M\beta_{\text{мк}}(t) + Y\beta_{\text{мк}}(t) l_{rm} = Y_a(t) l_{rm} - M_a(t) = 0. \end{cases} \tag{4}$$

Раскроем выражения (4) с использованием [9]:

$$\begin{cases} C_{Y\beta\text{мк}}(t)\rho\dfrac{v(t)^2}{2}A_{L\sigma} - C_{Ya}(t)\rho_a\dfrac{vk(t)^2}{2}A_{VL} = C^{\alpha}{}_{Yr}(\delta-\eta\beta)\rho\dfrac{v(t)^2}{2}A_r; \\ C_{m\beta\text{мк}}(t)\rho\dfrac{v(t)^2}{2}A_{L\sigma}L + C_{Y\beta\text{мк}}(t)\rho\dfrac{v(t)^2}{2}A_{L\sigma}l_{rm} = C_{Ya}(t)\rho\dfrac{vk(t)^2}{2}A_{VL}l_{rm} - C_{ma}(t)\rho\dfrac{vk(t)^2}{2}A_{VL}L, \end{cases} \quad (5)$$

где $C_{Y\beta\text{мк}}(t)$ — текущий коэффициент позиционной силы корпуса с учетом влияния мелководья и эффекта канала; $C_{m\beta\text{мк}}(t)$ — текущий коэффициент позиционного момента корпуса с учетом влияния мелководья и эффекта канала; $A_{L\sigma}$ — приведенная площадь погруженной части ДП судна, м^2; $C_{Ya}(t)$ — текущий приведенный коэффициент нормальной составляющей силы ветра; $C_{ma}(t)$ — текущий приведенный коэффициент ветрового момента корпуса; A_{VL} — площадь проекции надводной части судна на продольную вертикальную плоскость; L — длина судна по действующей ватерлинии, м; $v(t)$ — текущая скорость движения судна, м/с; $vk(t)$ — текущая скорость кажущегося ветра, м/с; η — коэффициент влияния корпуса; β — угол дрейфа судна, рад; δ — угол перекладки руля, рад; A_r — площадь руля, м^2; ρ — плотность воды, кг/м^3; ρ_a — плотность воздуха, кг/м^3.

Второе уравнение системы (5) зависит при данных значениях скорости движения судна, скорости кажущегося ветра и угла кажущегося ветра зависит только от угла дрейфа судна $\beta(t)$.

Первое уравнение системы (5) позволяется определить значение угла перекладки руля $\delta(t)$, необходимое для того, чтобы удержать судно при данном угле дрейфа

$$\frac{C_{Y\beta\text{мк}}(t)\rho\dfrac{v(t)^2}{2}A_{L\sigma} - C_{Ya}(t)\rho\dfrac{vk(t)^2}{2}A_{VL}}{C^{\alpha}{}_{Yr}\rho\dfrac{v(t)^2}{2}A_r} + \eta\beta(t) = \delta(t). \quad (6)$$

Решение уравнений (5) и (6) предлагается вести в приведенной последовательности.

1. Задаваясь значениями необходимой скорости движения судна, направлением и скорость кажущегося ветра, по второму уравнению системы (5) определяется угол дрейфа судна, с которым данное судно будет двигаться по данному каналу или фарватеру определенной ширины и глубины (глубина и ширина фарватера заранее известны из промеров и других гидрографических работ).

2. В соответствии с уравнением (6) определяется необходимый угол перекладки руля для осуществления такого движения.

3. Если угол перекладки руля, определенный по выражению (6), превышает допустимое значение, значит, судно с данной скоростью в условиях конкретного ветра не может удержаться на канале с определенным углом дрейфа (движение судна не будет безопасным).

4. Если угол перекладки руля для удержания определенного угла дрейфа будет допустимым, то определяется текущая ширина канала, занимаемая судном при движении с данным углом дрейфа по выражению:

$$Ш_к(t) = L\sin\beta(t) + B\cos\beta(t), \quad (7)$$

где B — ширина судна.

5. Выполняется сравнение найденного значения $Ш_к(t)$ со значением $Ш_б(t)$, найденным по выражению (1) для данного участка движения судна.

6. Если величина $Ш_к(t)$ больше $Ш_б(t)$, то движение судна на данном участке может привести к навалу на суда, стоящие возле причала, или другие объекты, ограничивающие текущую безопасную ширину канала.

Выводы

Перед заходом крупнотоннажного судна по выражениям (1) – (7) могут быть определены условия безопасного прохода на участках каналов и фарватеров, где судно осуществляет равномерное прямолинейное движение в условиях данного ветра, а также способы маневрирования судна для снижения опасности возможного столкновения или навала [10].

На основании полученных данных администрациями морских портов может быть принято решение об особых условиях обеспечения безопасности захода конкретного судна.

Предлагаемый метод может использоваться администрациями портов для оценки безопасности захода конкретного судна в порт, в частности, при автоматизации решения подобных задач.

Список литературы

1. *Ершов А. А.* От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Германия, 2013. — 146 с.

2. *Ершов А. А.* Некоторые аварии и катастрофы отечественных и иностранных судов: монография / А. А. Ершов, В. И. Никольский. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 196 с.

3. *Логиновский В. А.* Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.

4. *Астерин В. В.* Принципы координации подсистем судна для предупреждения столкновений / В. В. Астерин, Е. В. Хекерт // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013.— № 2 (21). — С. 13–22.

5. *Сазонов А. Е.* Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.

6. *Бурмака А. И.* Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20– 22.

7. *Некрасов С. Н.* Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.

8. *Ершов А. А.* Использование зон безопасного расхождения для движения судов на подходах к портам и внутренних водных путях: сб. науч. тр. проф.-преп. сост. ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — 2014. — С. 6–13.

9. *Паринов П. П.* Новые способы обеспечения безопасного движения судов в Большом порту Санкт-Петербург и на подходах к порту: дис. … канд. техн. наук: 05.22.19. — Защищена 21.12.2010; Утв. 12.06.2011 / П. П. Паринов.— СПб., 2010 — 120 с.

10. *Ершов А. А.* Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. … д-ра техн. наук: 05.22.19. — Защищена 19.11.2012; Утв. 20.05.2013 / А. А. Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.

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

УДК 529.5.01

А. В. Бондаренко,
канд. техн. наук, доц.;

В. А. Некрасов,
д-р техн. наук, проф.;

А. П. Ястреба,
ст. преп.

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА БУКСИРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОРТА

METHODOLOGY OF SELECTION OF OPTIMAL STRUCTURE OF THE FLEET HARBOUR TUG

В статье рассмотрена актуальная задача повышения эффективности буксирного флота порта и предложена методика выбора оптимального состава буксирного обеспечения, в основу которой положены методы статистического моделирования, теории массового обслуживания и теории корабля, а также разработанные авторами алгоритмы. Описан метод расчета сил, действующих на суда при их транспортировке к причалам порта, и перевода этих сил в необходимую суммарную тягу буксиров. Приведен метод расчета экономических показателей работы портовых буксиров, занятых в маневровых операциях. Предложен алгоритм формирования ордера с определением необходимого количества буксиров для выполнения маневренных операций в текущих гидрометеорологических условиях порта. Разработана модель функционирования портовых буксиров. Сформулирована и решена принципиально новая оптимизационная задача определения необходимого состава буксирного флота порта.

The article deals with the current task of improving the efficiency of the harbour tug fleet. The methodology of the selection of optimal composition of the towing supply is suggested. The technique is based on the methods of statistical modeling, queuing theory and the theory of the ship, as well as algorithms developed by the authors. The method of calculating the forces which act on the vessels during their transportation to the port quay, and the transfer of these forces to the required total bollar pull of tugs. The method for calculating the economic performance of the port tugs engaged in mooring operations is considered. The algorithm for the formation of the order with the determination of the required number of tugs to carry out maneuver operations in the current hydrometeorological conditions of the port is suggested. The model of the functioning of the port tugs is developed. The new optimization problem of the determination of the required composition of the port towing fleet is formulated and fundamentally solved.

Ключевые слова: портовый буксир, порт, модель функционирования, эффективность, буксирное обеспечение, оптимизация, методика, тяга, маневровые операции, моделирование.

Key words: harbor tug, port, model of functioning, efficiency, tug assist, optimization, methodology, bollard pull, harbor towage, simulation.

БУКСИРНОЕ обеспечение порта является важнейшей составляющей его эффективности и безопасности. Состав буксирного флота в порту зависит от количества заходящих судов и их дедвейта, географического положения, а также уровня технологического оснащения причалов. Кроме того, на количество буксиров оказывают влияние принятые нормы буксирного обеспечения по швартовке/отшвартовке и сопровождению судов. В разных странах мира действуют различные подходы к формированию норм или установлению количественного состава буксиров для выполнения маневровых операций.

Первый подход, принятый в России и Украине, основан на применении руководящих документов (РД) [1], [2], устанавливающих количество буксиров и мощности их главных двигателей в зависимости от типа судна и его дедвейта. Выполненный анализ этих документов позволяет поставить под сомнение целесообразность их использования. В качестве аргументов можно указать следующее:

– год утверждения РД [1], поскольку с того времени характеристики буксиров претерпели значительные изменения;

– РД [1], [2] полностью не охватывают все типы судов и их дедвейт (в частности, отсутствуют данные по судам-автомобилевозам).

– с момента утверждения РД существенным образом изменились характеристики судов (например, нормы не охватывают танкеры дедвейтом свыше 230 тыс. т, контейнеровозы — свыше 40 тыс. т, навалочники — свыше 160 тыс. т);

– выбор буксиров производится на основе мощности их главных двигателей, а не тяги, между тем современный буксир с меньшей мощностью может иметь тягу большую, чем буксир с большей мощностью более ранних лет постройки, да и сама тяга буксира зависит от типа движителя: винта, винторулевой колонки, крыльчатого движителя;

– нормы буксирного обеспечения установлены на основе предельных значений ветра и волнения без учета индивидуальных особенностей портов: района расположения, климата и т. д.

Второй подход, принятый во многих портах мира, основан на использовании приближенных зависимостей и различных таблиц или графиков для оценки требуемых характеристик буксиров. В качестве его недостатка следует отметить, что зачастую неизвестно, на основе каких данных и для каких гидрометеорологических условий получены эти формулы.

Таким образом, в настоящее время актуальной является задача разработки методики формирования оптимального состава флота портовых буксиров, а также метода расчета необходимого количества и тяги буксиров для выполнения маневровых операций применительно к конкретному порту и текущим погодным условиям.

Выполненный анализ исследований и публикаций позволяет сделать вывод о незначительном количестве статей по данной тематике. В первую очередь, следует отметить работу [3], в которой приведены данные по различным портам мира и предложены графики выбора количества буксиров и их тяги в зависимости от типа судна и его дедвейта. Эта работа содержит рекомендации по расчету требуемой тяги буксиров. Некоторые зависимости по оценке тяги буксиров приведены в работах [4] и [5]. В то же время, в указанных статьях не рассматривается вопрос выбора оптимального состава буксирного обеспечения порта.

Наиболее комплексным исследованием является работа [6], в которой предложена методика выбора оптимального состава буксирного флота порта. Главным недостатком этой методики является применение детерминированного подхода. Однако, как свидетельствуют статистические данные, количество судозаходов в порт и продолжительность операций являются случайными величинами. Таким образом, можно сделать вывод, что задача выбора оптимального состава флота портовых буксиров с учетом случайного характера исходных данных является малоизученной и актуальной.

Для выбора оптимального, с точки зрения экономической эффективности, состава буксирного флота порта авторами разработана методика, основу которой составляют:

– метод расчета сил, действующих на суда при их транспортировке к причалам порта, и перевод этих сил в необходимую суммарную тягу буксиров;

– алгоритм формирования ордера с определением необходимого количества буксиров для выполнения маневровых операций в текущих гидрометеорологических условиях порта;

– модель функционирования буксирного флота порта;

– алгоритм расчета экономических показателей работы портовых буксиров, занятых в маневровых операциях;

– формулировка и решение принципиально новой оптимизационной задачи определения необходимого состава буксирного флота порта.

Основными факторами, влияющими на суммарную величину потребной тяги буксиров, являются:

– размер сопровождаемого судна;

– аэродинамические нагрузки на его надводную часть;

– силы гидродинамической природы, действующие на погруженную в воду часть корпуса;

– инерционные силы, вызванные изменением скорости судна при его перемещениях в акватории порта.

Корректное определение этих сил обеспечивает не только выбор достаточного количества буксиров и значений их тяговых усилий, но и согласование процессов моделирования движения судна с натурными данными его буксировок в акватории порта.

В данной методике для определения необходимого количества буксиров-кантовщиков и их тяговых характеристик используется метод «накрытия» всех возможных расчетных схем одной схемой, которая выделяет наиболее ответственные стадии операций причаливания-отчаливания, обычно сопровождающиеся наибольшими развиваемыми усилиями. Среди множества стадий кантования судна сопровождающими его буксирами, в стесненной акватории порта, таковыми являются финальная стадия причаливания и начальная стадия отчаливания. В обоих случаях судно располагается параллельно причалу, и развиваемые усилия ориентированы в направлении, перпендикулярном его диаметральной плоскости. Эта расчетная ситуация традиционно находится в основе всех методик выбора необходимого количества и мощности буксиров-кантовщиков [3], [7], [8].

Реализация расчетной схемы осуществляется поэтапно, путем определения усилий от действия ветра и волнения, а также вызываемых движением самого судна и инерцией процессов его торможения и ускоренного перемещения. Итоговое значение усилия, определяющее величину потребной тяги буксиров в зависимости от водоизмещения или дедвейта швартуемого / отшвартовываемого судна, определяется по формуле

$$F = S_f(F_1 + F_2 + F_3 + F_4), \tag{1}$$

где S_f — коэффициент запаса; F_1 — усилие от ветра, т; F_2 — усилие от действия волн, т; F_3 — гидродинамическая сила, т; F_4 — инерционная сила, т.

Сила от действия ветра [3], [7], [8] определяется по следующей общепринятой формуле:

$$F_1 = \frac{1}{2}\frac{\rho_1 V_1 A_1 C_1}{g10^3}, \tag{2}$$

где ρ_1 — плотность воздуха, кг/м^3; V_1 — расчетная скорость ветра, м/с; A_1 — площадь парусности судна, м^2; C_1 — коэффициент аэродинамического сопротивления.

Значения расчетной скорости ветра в текущий момент времени V_1 генерируются с помощью датчика случайных чисел в соответствии с заданным законом распределения. Площади парусности A_1 рассчитываются в зависимости от типа судна, его дедвейта и состояния загрузки: «в полном грузу» или «в балласте» [9], [10].

Для приближенной оценки волнового воздействия в практике проектирования портов [3], [7], [8] используется следующая формула:

$$F_3 = 0{,}112 L_{BP} H_{1/3}^2, \tag{3}$$

где L_{BP} — длина судна между перпендикулярами, м; $H_{1/3}$ — высота значительных волн, м.

Сила сопротивления воды, действующая на погруженную часть корпуса перемещающегося по акватории порта судна [3], [7], [8], рассчитывается по формуле

$$F_2 = \frac{1}{2}\frac{\rho_2 V_2 A_2 C_2}{g10^3}, \tag{4}$$

где ρ_2 — плотность морской воды, кг/м^3; V_2 — расчетная скорость движения при швартовке, м/с; A_2 — проекция погруженной части корпуса на диаметральную плоскость, м^2; C_2 — коэффициент гидродинамического сопротивления.

Определение величины F_2 выполняется при следующих данных: $\rho_2 = 1025$ кг/м^3, $V_2 = 0{,}3$ м/с, $C_2 = 0{,}7$. Значение площади A_2 определяется в зависимости от типа и дедвейта судна, состояния загрузки («в полном грузу» или «в балласте») [9], [10].

В процессе рассматриваемых стадий маневровых операций судно движется лагом с переменной скоростью. Возникающие при этом массовые и гидродинамические инерционные силы определяются величиной водоизмещения судна и коэффициента присоединенных масс μ_{22}. В практике проектирования портов суммарную инерционную нагрузку, необходимую для завершения движения судна при причаливании или для разгона до определенной величины при отчаливании [3], [8], рекомендуется вычислять по формуле

$$F_4 = f_4 \frac{0,07 V_4^2 \Delta}{S_4}, \tag{5}$$

где f_4 — инерционный коэффициент, принимаемый для морских транспортных судов равным $f_4 = 1,6$; V_4 — начальная или конечная скорость, рекомендуемое значение которой $V_4 = 0,5$ уз ($V_4 = V_0 = 0,26$ м/с); Δ — водоизмещение судна, т; S_4 — дистанция перемещения судна, $S_4 = S_0 = 40$ м.

Для решения задачи выбора оптимального количества буксиров, занятых в маневровой операции, был разработан алгоритм формирования ордера, обеспечивающего заданную тягу и удовлетворяющего следующим условиям [6]:

– требуемая суммарная тяга буксиров, участвующих в маневровой операции, должна быть не более фактической тяги выбранных буксиров;

– количество буксиров, занятых в маневровой операции, должно быть не менее двух и не более пяти;

– в одной маневровой операции является допустимым применение буксиров только из смежных групп (ограничение по тяге).

Процесс формирование ордера начинается с определения минимального количества буксиров — $N_{\min}$. Для судов дедвейтом не более 150 тыс. т задается два буксира, в противном случае — три. Предполагается, что вначале выбираются буксиры из одной группы, затем определяется минимальная требуемая тяга одного буксира

$$Z = \frac{Z_{req}}{N_{\min}} \tag{6}$$

и производится выбор буксиров по условию

$$Z_j \geq Z, \tag{7}$$

где $Z_{req} = F$ — суммарная тяга буксиров, рассчитываемая по формуле (1).

Если свободных буксиров с тягой, равной или большей Z, не оказалось, то увеличивается минимальное количество буксиров на единицу. Операция увеличения продолжается до тех пор, пока не будет превышено максимально допустимое в ордере количество буксиров или при выполнении условия (7). В первом случае выдается сообщение об отсутствии свободных буксиров и судно становится в очередь на обслуживание в ожидании освобождения требуемых буксиров. Во втором случае в цикле выполняется выбор требуемых буксиров по формуле

$$Z_j \geq Z_{req_j}, \tag{8}$$

где j — порядковый номер буксира в ордере ($j = 1, ..., N_{\min}$); Z_{req_j} — требуемая тяга для j-го буксира.

Требуемая тяга для j-го буксира рассчитывается по формуле

$$Z_{req_j} = \frac{Z_{req} - Z_{sum}}{N_{\min} - j - 1}. \tag{9}$$

Здесь Z_{sum} — суммарная тяга выбранных для буксировки буксиров;

Выбранным буксирам присваивается статус «занят». Также операция буксировки не может быть выполнена, если требуемое количество буксиров больше количества буксиров, свободных в текущий момент времени.

В основу модели функционирования буксирного флота положены методы теории массового обслуживания [11] – [13] и имитационного моделирования [14] – [16]. Предполагается, что моделируемая система «порт» состоит из следующих элементов: *подходной канал*, *причалы* и *буксиры*. При этом данные элементы являются обслуживающими устройствами, которые могут находиться в двух состояниях: «свободен» или «занят». Прибытие судов в порт рассматривается в виде потока заявок, распределяемых по причалам и требующих обслуживания.

Совокупность причалов порта представляется многоканальной системой массового обслуживания, находящейся в переменных (случайных) погодных условиях эксплуатации при случайном потоке заявок. Интенсивность этого потока определяется на основе статистических данных за рассматриваемый период (обычно календарный год). Затем поток заявок распределяется по причалам в соответствии с заданной интенсивностью — количеством причаливаемых судов в единицу времени (один год), дифференцируемым по типу судов и их дедвейту (рис. 1).

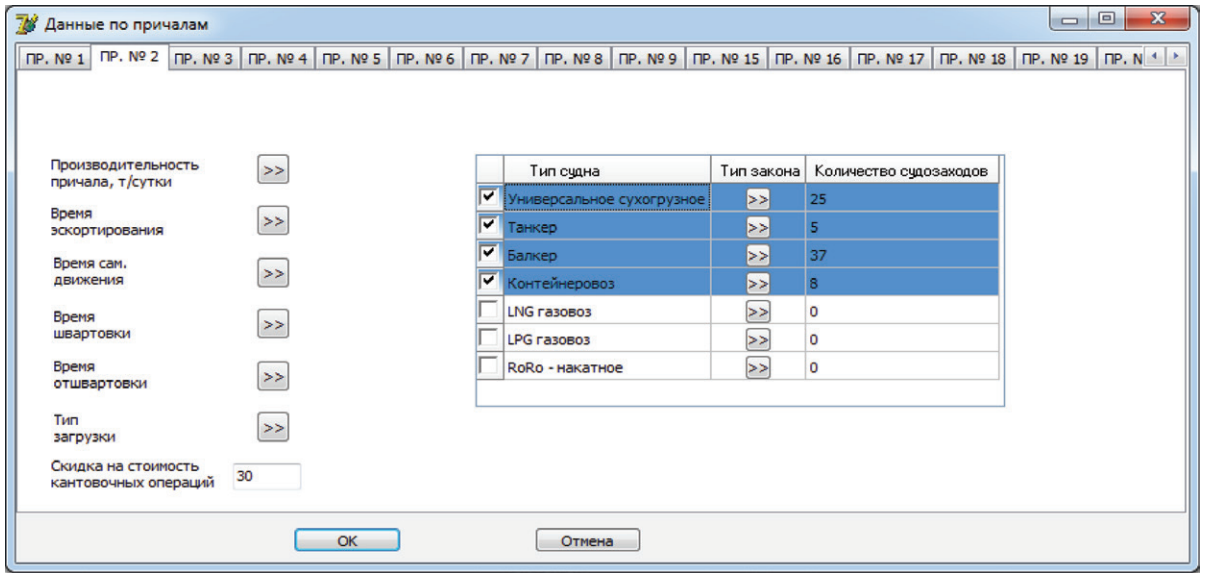


Рис. 1. Данные по судопотоку для причала № 2

Случайная величина дедвейта определяется согласно закону распределения и его параметрам — математическому ожиданию, дисперсии и т. д. В качестве примера приведена гистограмма такого распределения и ее аппроксимация логнормальным законом для сухогрузных судов, швартующихся к причалу № 2 одного из портов Украины с интенсивностью в среднем 25 судов в год (рис. 2).

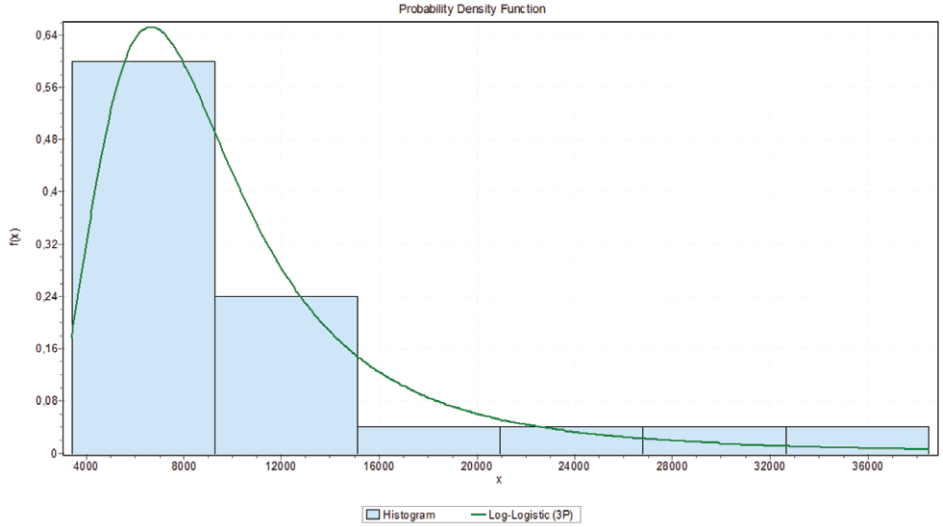


Рис. 2. Распределение сухогрузных судов по дедвейту (причал № 2)

Если дедвейт входящих в порт судов нельзя описать ни одним из известных законов распределения, то для генерации значения случайной величины используется гистограмма (рис. 3).

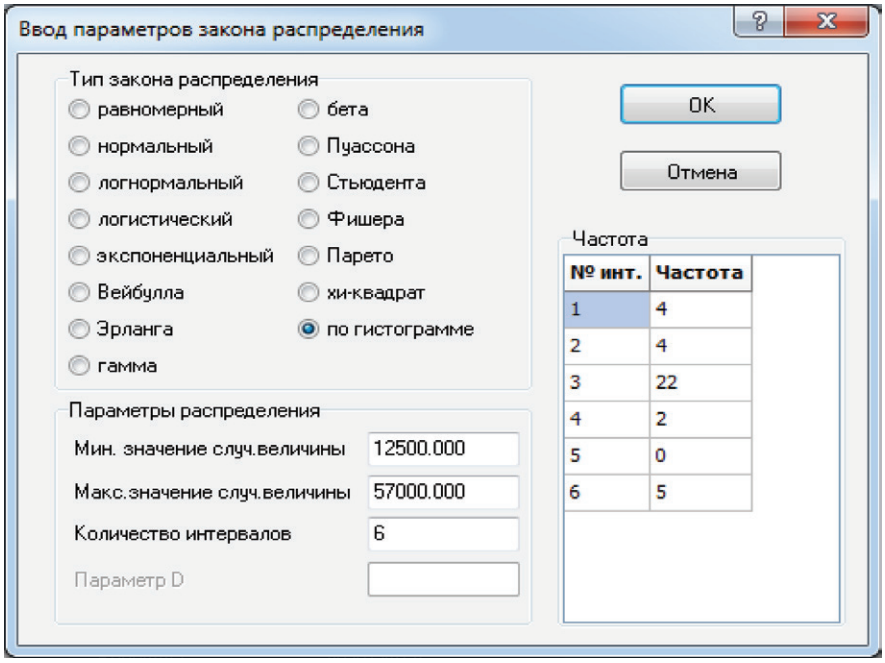


Рис. 3. Диалоговое окно выбора закона распределения случайной величины

При реализации модели функционирования для каждого причала генерируется время появления очередного судна — заявки на обслуживание. Для полученной заявки в зависимости от типа судна, его дедвейта и погодных условий на время проведения маневренных операций по формуле (1) определяется суммарный требуемый упор портовых буксиров и подбирается их количество из существующего состава буксирного флота порта с учетом занятости буксиров на операциях с другими судами. Проверяется возможность входа судна в порт. Для этого должны выполняться следующие условия: причал должен быть в состоянии «свободен», канал — «свободен», погодные условия — «допустимые» и иметься в наличии достаточное количество свободных буксиров требуемой тяги.

При выполнении всех указанных условий моделируется проведение следующих этапов маневровых операций: эскортирование (сопровождение) судна по подходному каналу, транспортировка его к причалу и причаливание — швартовка. При этом для выбранных буксиров меняется статус со «свободен» на «занят» и определяются промежутки времени этапов выполнения маневровых операций. Операция эскортирования судна по подходному каналу до входа в порт обычно осуществляется одним буксиром, а операция сопровождения на этом же участке — двумя. Предусмотрена возможность установления и других режимов плавания в зависимости от требований порта. Операцией «швартовки» условно называется перемещение судна от входа в порт до причала.

Случайные величины промежутков времени выполнения этапов маневровых операций определяются соответствующими законами распределения времени эскортирования или сопровождения, транспортировки к причалу и причаливания (швартовки), а также параметрами этих законов распределения, такими как среднее значение промежутка времени, его дисперсия и т. д. В случае невыполнения условий входа судна в порт заявка ставится в очередь на обслуживание, т. е. моделируется событие «якорная стоянка судна». После выполнения маневровых операций по эскортированию и доставке судна к причалу буксиры, занятые эскортированием и транспортировкой, освобождаются (получают статус — «свободен»).

Время стоянки судна у причала при выполнении погрузочно-разгрузочных работ у причала моделируется в зависимости от производительности его оборудования. Случайная величина про-

изводительности каждого причала определяется соответствующим законом распределения и его параметрами. После завершения операции по погрузке-разгрузке проверяется возможность отхода судна от причала (наличие свободных буксиров, незанятости подходного канала и допустимости погодных условий). При невыполнении этих условий судно остается у причала и дожидается своей очереди на обслуживание.

Если условия, необходимые для вывода судна из порта, выполняются, то из числа незанятых выбирается необходимое количество буксиров (получают статус «занят»), определяются промежутки времени операций по отчаливанию и доставке судна к выходу из порта (отшвартовки), а также прохождению канала (эскортирование, или сопровождение), канал переводится в статус «занят», моделируется выполнение маневровых операций. Случайные величины промежутков времени выполнения этапов этих маневровых операций также определяются соответствующими законами распределения времени отчаливания и транспортировки к выходу из порта, прохождения подходного канала, а также параметрами этих законов распределения.

Погодные условия эксплуатации порта задаются с помощью долговременного закона распределения скорости ветра в районе его географического расположения. Оценка законов распределения характеристик производительности оборудования причалов порта производится по средним значениям производительности причалов порта и по статистическим данным времени стоянки судов в этом порту под погрузкой-разгрузкой за календарный год.

Оценка законов распределения времени эскортирования судов в подходном канале порта, буксировки его от входа в порт к причалам и обратно осуществляется также по статистическим данным работы буксиров порта. По завершении времени маневровых операций с судном, покидающим порт, заявка уходит из модели, буксиры и канал освобождаются.

Процесс моделирования производится на промежутке времени, равном календарному году, с шагом по времени, равным одной минуте. За начальное состояние системы принимается такое, при котором все причалы считаются незанятыми, буксиры — свободными, подходной канал — свободным.

Разработанная модель функционирования дополнена блоком расчета показателей эффективности портовых буксиров. Оценка эффективности выполняется путем расчета расходов и доходов портовых буксиров при выполнении ими следующих основных операций:

– эскортирование (сопровождение);

– швартовка / отшвартовка / перестановка;

– ожидание (простой).

Метод расчета экономических показателей работы портовых буксиров учитывает накопление всех доходов от указанных операций, а также основные статьи эксплуатационных расходов. При этом расходы топлива определяются не максимальными значениями мощности двигателей буксиров, а текущими затратами мощности, необходимыми для развития потребной тяги, обеспечивающей выполнение маневровой операции при текущих погодных условиях с учетом дополнительного силового воздействия, обусловленного кинематикой судна при выполнении текущей операции. С учетом специфики работы предполагается, что доход портового буксира состоит из двух составляющих:

– почасовой платы за сопровождение (эскортирование);

– платы за выполнение маневровых операций (буксирного сбора).

Эксплуатационные расходы портового буксира включают расходы на топливо, экипаж, амортизацию, ремонт, техническое обслуживание, докование и классификационное освидетельствование.

Расходы на ремонт и техническое обслуживание определяются по следующей формуле:

$$P_{\text{рем}} = \frac{q_{\text{рем}} \cdot K}{100}, \qquad (10)$$

где $q_{\text{рем}}$ — норма расходов на ремонт, %; K — стоимость портового буксира.

Расходы на докование

$$P_{\text{док}} = \frac{q_{\text{док}} \cdot K}{100}, \tag{11}$$

где $q_{\text{док}}$ — норма расходов на докование, %.

Амортизационные расходы

$$P_{\text{ам}} = \frac{q_{\text{ам}} \cdot K}{100}, \tag{12}$$

где $q_{\text{ам}}$ — норма амортизационных расходов, %.

Расходы на содержание персонала буксиров (экипажей)

$$P_{\text{эк}} = q_{\text{эк}} \cdot N_{\text{эк}} \cdot 11, \tag{13}$$

где $N_{\text{эк}}$ — количество экипажа; $q_{\text{эк}}$ — средняя зарплата одного члена экипажа в месяц.

Расходы на топливо определяются с помощью следующего выражения:

$$P_{\text{тп}} = \frac{q_{\text{тп}} \cdot Ne \cdot t}{1000000}, \tag{14}$$

где $q_{\text{тп}}$ — удельный расход топлива, г/(кВт·ч); Ne — необходимая для выполнения портовой операции мощность главных двигателей буксира, кВт; t — время маневровой операции или операции сопровождения, определяемое в модели функционирования, ч.

Исходя из ранее изложенного, для расчета такого показателя эффективности, как прибыль от эксплуатации флота портовых буксиров, в первом приближении необходимо определить доходы от маневровых операций и расходы на эксплуатацию буксиров, которые выражаются через время функциональных операций и количество используемых буксиров.

Для реализации предлагаемой методики была разработана соответствующая программа определения эффективности существующего или назначаемого состава буксиров, обслуживающего существующий или назначаемый судопоток, распределенный по комплексу всех существующих причалов или по комплексу причалов ближайшего будущего. Диалоговое окно моделирования этой программы представлено на рис. 4.

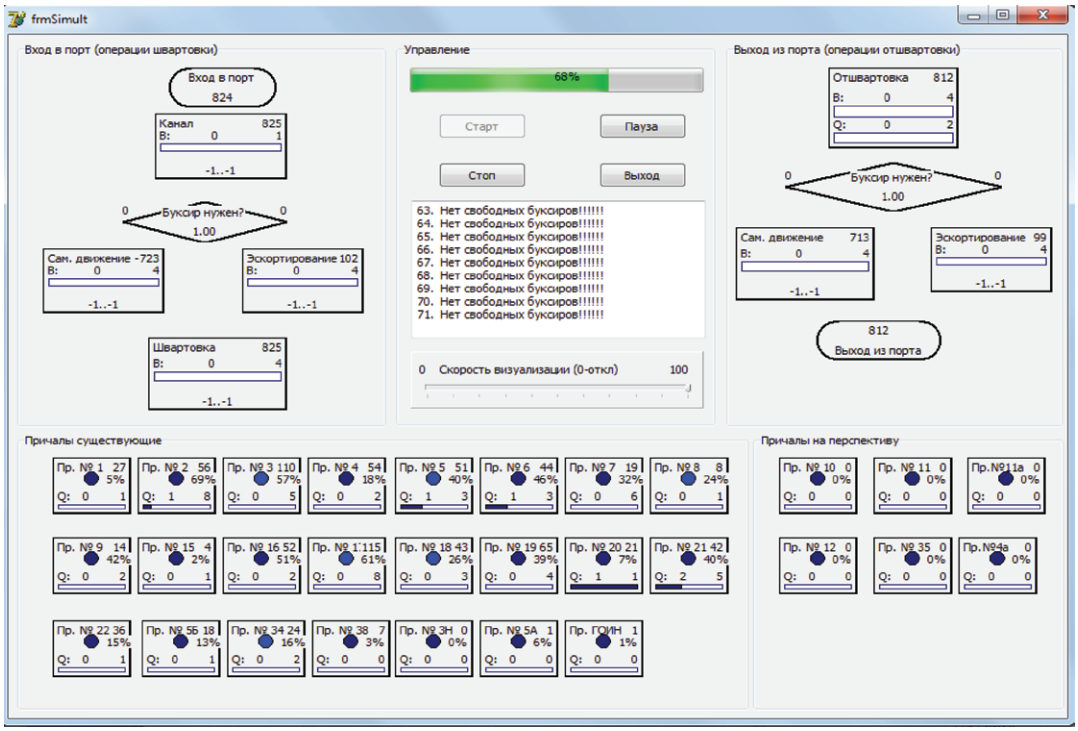


Рис. 4. Главное диалоговое окно программы определения эффективности существующего или назначаемого состава буксиров

Разработанная авторами методика предусматривает возможность решения задачи выбора оптимального состава флота портовых буксиров двумя методами. В основу первого метода заложено формирование оптимального состава буксирного обеспечения порта из имеющихся в порту буксиров, а также предварительно сформированного множества проектов с известными тяговыми характеристиками. Матрица буксиров должна содержать следующие данные: название буксира, количество экипажа, упор, мощность, скорость, стоимость, почасовая ставка, месячный фонд зарплаты, расходы на ремонт и снабжение, годовые амортизационные отчисления. В данном случае выбор оптимального состава буксирного обеспечения порта проводится на основе анализа времени использования буксиров каждого типа. Буксиры с минимальным временем использования нецелесообразно оставлять в составе флота.

Второй метод предусматривает решение оптимизационной задачи. При этом предполагаются известными количество типов буксиров, которые могут быть использованы для выполнения маневровых операций. В качестве целевой функции может быть выбран показатель максимума прибыли или минимума суммарной тяги буксиров. Вектор независимых переменных включает тягу на гаке Z_i и количество буксиров i-го типа x_i.

Система ограничений задачи содержит требования:

– к количеству буксиров определенного типа

$$x_i^{\min} \le x_i \le x_i^{\max}, \tag{15}$$

где $x_i^{\min} = 0$ — минимальное количество буксиров i-го типа; $x_i^{\max}$ — максимальное количество буксиров i-го типа;

– к тяге на гаке буксиров определенного типа

$$Z_i^{\min} \le Z_i \le Z_i^{\max}, \tag{16}$$

где $Z_i^{\min}$ — минимальная тяга буксиров i-го типа; $Z_i^{\max}$ — максимальная тяга буксиров i-го типа.

Для решения поставленной оптимизационной задачи применяется генетический алгоритм [17], [18].

Выводы

1. Разработанная методика и программный продукт обеспечивают реализацию следующих функций:

– выбор оптимального состава существующего или обновленного буксирного обеспечения порта по типам буксиров и их тяговым характеристикам с учетом индивидуальных особенностей акватории порта, климата, количества причалов и установленного режима плавания;

– определение экономических результатов безопасного обслуживания судов в комплексе действующих или расширяемых причалов порта существующим или назначаемым составом буксирного флота;

– решение основных проблем проектирования портовых буксиров, в частности создание ряда типоразмеров таких судов в зависимости от потребной тяги.

2. Полученные в ходе исследования результаты предлагается использовать для оптимизации состава существующего или обновленного буксирного обеспечения порта, а также выбора проектных характеристик портовых буксиров.

3. Возможно и другое применение методики и программного комплекса. В частности, их можно использовать для решения следующих задач:

– оперативное решение всех текущих вопросов эскортного сопровождения и швартовки / отшвартовки судов в современном порту с помощью мощных буксиров;

– формирование обновлений раздела «Нормы занятости буксиров-кантовщиков на маневровых операциях с одним судном» обязательного Постановления порта;

– подготовка и выполнение корректировки соответствующих разделов «Норм технологического проектирования морских портов» для Украины [1].

Список литературы

1. РД 31.31.37–78. Нормы технологического проектирования морских портов. Основные положения. — М.: Минморфлот СССР, 1978. — 122 с.

2. РД 31.3.05–97. Нормы технологического проектирования морских портов. — М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 1998. — 177 с.

3. *Hensen H.* Tug use in port. A practical guide. — 2-nd edition / H. Hensen. — Port Rotterdam: Nautical Institute, 2003. — 192 p.

4. Tugs and Tows — A Practical Safety and Operational Guide [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.shipownersclub.com/loss-prevention/publications (дата обращения: 24.06.2015 г.).

5. *Ермолаев Г. Г.* Справочник капитана дальнего плавания / Г. Г. Ермолаев. — М.: Книга по требованию, 2013. — 245 с.

6. *Алявдина Т. Ф.* Разработка методики выбора оптимальных типов и количества буксиров для морского порта / Т. Ф. Алявдина: дис. … канд. техн. наук: 05.22.19. — Л.: ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова, 1984. — 239 с.

7. *Agerschou H.* Planning and designing of ports and marine terminals. — 2-nd edition / H. Agerschou, I. Dand, T. Ernst. — London: Thomas Telford, 2004. — 444 p.

8. *Gaythwaite J. W.* Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring, and Repair of Vessels / J. W. Gaythwaite. — Reston: ASCE Press, 2004. — 564 p.

9. *Yasuhiro A.* Ship Dimensions of Design Ship under Given Confidence Limits / A. Yasuhiro, T. Hironao // Technical Note of the Port and Harbour Research Institute. — 1998. — № 911. — 25 p.

10. *Hironao T.* Study on Standards for Main Dimensions of the Design Ship / T. Hironao, G. Ayako, A. Motohisa // Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management. — 2006. — № 309. — June. — 103 p.

11. *Гнеденко Б. В.* Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. — Изд. 4-е, испр. — М.: Изд-во ЛКИ, 2007. — 397 с.

12. *Саати Т. Л.* Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Т. Л. Саати. — Изд. 3-е. — М.: ЛИБРОКОМ, 2010. — 520 с.

13. *Stewart W. J.* Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation: The Mathematical Basis of Performance Modeling / W. J. Stewart. — Princeton: Princeton University Press, 2009. — 776 p.

14. *Law A. M.* Simulation modeling and analysis. — 5-th edition / A. M. Law. — New York: McGraw-Hill, 2015. — 804 p.

15. *Chan V.* Theory and Applications of Monte Carlo Simulations / V. Chan. — InTech, 2013. — 284 p.

16. *Советов Б. Я.* Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — 6-е изд., стер. — М.: Высш. школа, 2009. — 342 с.

17. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 452 с.

18. *Sivanandam S. N.* Introduction to Genetic Algorithms / S. N. Sivanandam, S. N. Deepa. — New York: Springer, 2007. — 442 p.

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

УДК 656.085

С. С. Мойсеенко,
д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В МОРЕПЛАВАНИИ И ОКЕАНИЧЕСКОМ РЫБОЛОВСТВЕ

DESIGN RISK MANAGEMENT SYSTEM IN SHIPPING AND OCEANIC FISHERY

В статье рассмотрены вопросы методологии проектирования системы управления рисками на уровне рыбопромысловых и судоходных компаний при освоении биоресурсов Мирового океана и транспортировке сырья. Определены практико-ориентированные задачи, для решения которых создается система, и основные этапы проектирования: конструирование процессной модели; определение параметров процессов и индикаторов рисков; формирование структурной модели системы управления рисками. Предложены варианты организации работы по управлению рисками в судоходных / рыбопромысловых компаниях, а также определены методологические основы и алгоритм проектирования системы управления рисками, что является базисом выполнения проектных работ для конкретных компаний и заданной степени детализации.

The article discusses the design methodology of risk management at the level of fishing and shipping companies in the development of biological resources of the oceans and transportation of raw materials. The main tasks that should solve the projected system have been determined. The main stages of the design include: the construction of the process model; definition of process parameters and risk Indicators; the formation of a structural model of the risk management system. Options for risk management in the fishing and shipping companies were offered. Thus, defined-cal methodological framework and algorithm design of the risk management system in fishing and shipping companies that is the basis of the Run-design work for specific companies and the desired degree of detail.

Ключевые слова: управление рисками, мореплавание, рыболовство, система, процессная модель, аварийность.

Key words: risk management, navigation, fisheries, a system, process model, the accident.

АКТУАЛЬНОСТЬ разработки и внедрения системы оценки и управления рисками в промышленном (океаническом) рыболовстве и морских перевозках обусловлена необходимостью снижения уровня аварийности и повышения надежности работы флота. Вопросы безопасности и управления рисками в мореплавании освещены в работах многих отечественных и иностранных исследователей [1] – [11]. На сегодняшний день существуют разработанные ИМО «Рекомендации по формальной оценке безопасности» («Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment»), имеющие важное практическое значение. Однако недостаточно разработаны вопросы проектирования систем управления рисками в рыбопромысловых / судоходных компаниях.

Целью статьи является разработка методологических основ проектирования системы управления рисками на уровне рыбопромысловых и судоходных компаний при освоении биоресурсов Мирового океана и транспортировке сырья.

Методологическим базисом проектирования системы управления рисками является системный подход. В этой связи, прежде всего, необходимо определить, какие виды деятельности и задачи должны решаться в проектируемой системе и посредством каких процессов эти виды деятельности / задачи будут реализованы.

После определения целей и задач проектирования необходимо разработать процессную модель будущей системы управления рисками. Основные задачи, которые должна решать проектируемая система, включают:

– организацию мониторинга работы флота в контексте безопасности ведения промысла и транспортировки сырья;

– формирование баз данных по аварийности флота;

– анализ аварийности флота и определение причинно-следственных связей аварий и промысловых происшествий;

– разработку сценариев развития аварийных ситуаций на основе ретроспективных данных (от прошлого к настоящему и будущему) и анализ действий экипажей;

– формирование рядов динамики (статистических данных по аварийности) и расчет математического ожидания / среднестатистических оценок частоты аварий по типам судов, сезонам, районам;

– разработку планов и содержания повышения квалификации специалистов (на основе анализа аварийности, действий экипажей судов и судовладельцев);

– решение практико-ориентированных задач по оценке и управлению рисками для каждого морского предприятия (рейса промысловых и транспортных судов, проведения различных операций в районах промысла и портах);

– организацию спасательных операций и консультативной помощи судам, терпящим бедствие (если это необходимо);

– организацию взаимодействия с вышестоящими организациями / системами, поддержание базы данных на уровне современности.

Решение практико-ориентированных задач по оценке и управлению рисками для каждого морского предприятия включает следующие операции [1], [2], [4], [7], [8]:

– идентификацию рисков;

– оценку уровня и цены риска;

– определение допустимого уровня риска;

– разработку мероприятий по снижению уровня риска;

– расчет эффективности и стоимости мероприятий;

– принятие управленческих решений;

– реализация решений и контроль.

Основные процессы, необходимые для реализации задач управления рисками:

1. *Организационно-управленческие* — организация выполнения всего комплекса работ и управление основными и вспомогательными процессами.

2. *Информационные* — сбор и систематизация данных и обеспечение работы системы необходимой информацией.

3. *Процессы мониторинга* — непрерывный процесс наблюдения за работой флота, сбора информации по вопросам аварийности, о состоянии внутренней и внешней среды и регистрации параметров наблюдаемых объектов / процессов, систематизация данных и оценка по выбранным критериями. Процесс мониторинга тесно связан с информационными процессами и представляет необходимые данные для информационной подсистемы (для формирования баз данных).

4. *Аналитические процессы* — это анализ данных по аварийности и воздействию на процессы промысла и транспортировки сырья факторов различной природы и идентификации рисков, расчеты, прогнозирование, оценка рисков и расчет цены риска и т. д.

5. *Процессы проектирования и планирования организационно-технического обеспечения безопасности судна* — разработка проектов промысловых логистических систем, транспортно-логистических систем обслуживания рыболовных судов в районах океанического промысла и планирование рейсов. Составной частью проектирования и планирования работы флота является расчет прогностических оценок рисков и сравнение их с допустимым уровнем. Если прогностические оценки риска превышают или близки к допустимому уровню риска, то разрабатывается проект / план мероприятий по снижению уровня рисков.

6. *Процессы консультирования и участия в организации спасательных операций в случаях аварий и других чрезвычайных ситуаций*.

7. *Процессы анализа ретроспективных сценариев развития аварий* [3] *и действий экипажа с целью определения содержания обучения / повышения квалификации специалистов.*

Все процессы характеризуются определенными параметрами и критериями, определяющими границы допустимых значений параметров, что необходимо для контроля функционирования системы управления рисками.

В любых системах можно выделить основные и вспомогательные процессы. В системе управления рисками к *основным процессам* относят: организационно-управленческие процессы, включающие процессы идентификации рисков; проектирование и планирование; обеспечение безопасности выполнения рейса судна. *Вспомогательные процессы*, обеспечивающие функционирование основных процессов, включают процесс мониторинга, информационные и аналитические процессы, включающие процессы анализа и консультирования, а также финансово-экономические процессы, включающие расчеты цены риска и эффективности мероприятий по снижению уровня рисков. Структура адаптивной процессной модели управления рисками приведена на рис. 1. Представленная модель отражает процессы и их взаимосвязи, посредством которых осуществляется управление рисками. Процессное представление системы управления позволяет реализовать выполнение следующих функций:

– организовать работу по управлению рисками без создания дополнительных административных структур, что представляется невозможным в небольших рыбодобывающих и транспортных компаниях;

– создавать системы управления рисками в крупных рыбопромышленных и транспортных компаниях при минимуме расходов на содержание специализированной структуры;

– создавать системы управления рисками в структурах федеральных агентств (рыболовного / морского флота), а также в специализированных региональных информационно-аналитических логистических центрах.



Рис. 1. Процессная модель системы оценки и управления рисками в океаническом рыболовстве и при транспортировке сырья

Основной задачей системы управления рисками является прогнозирование возникновения рисков и принятие упреждающих мероприятий для минимизации их уровня и последствий воздействия факторов внешней среды [1], [3], [4], [6]. Предлагаемая процессная модель системы оценки и управления рисками обладает свойством адаптации, поскольку она конструируется на основе

принципов разнообразия, дуальности и обратной связи. Согласно принципу разнообразия, разнообразие управляющей системы должно быть не меньше разнообразия объекта управления. Сущность принципа дуальности состоит в том, что, с одной стороны, невозможно осуществлять эффективное управление, не зная характеристик управляемой системы / объекта, а с другой — можно изучать эти характеристики в процессе управления, тем самым повышая качество управления. Сущность принципа обратной связи состоит в измерении характеристик управляемого объекта и выработке реакций, выражающихся в управляющих воздействиях [1].

Анализ структуры и характеристик процессной модели (см. рис. 1) позволяет утверждать, что проектируемая модель системы управления рисками удовлетворяет всем характеристикам и принципам адаптивной системы. На основе базисных модулей открывается возможность адаптации системы управления рисками к изменяющимся условиям.

Рыбопромысловая / судоходная компания это сложная производственная/транспортная система, в которой реализуется множество функций. Деятельность компании и принадлежащих ей рыбопромысловых / транспортных судов может быть охарактеризована многими показателями, каждый из которых представляет ту или иную информацию, относящуюся к объекту управления. Информация, представленная различными показателями, используется для решения задач. Поэтому для решения различного класса задач из массива информации необходимо выделить наиболее значимые показатели. Так, для задач управления рисками представляет интерес информация о техническом состоянии судов и их технико-эксплуатационных характеристиках. Например, представляет интерес информация о частоте отказов технических средств, тактико-технических данных гидроакустической аппаратуры, авариях и промысловых происшествиях, остойчивости и непотопляемости судна, квалификации экипажа, гидрологических и метеорологических характеристиках районов плавания и районах промысла, физико-химических свойствах груза (например, рыбной муки) и т. д.

Анализ динамики изменения показателей, их взаимосвязей и устойчивости позволит оценить (по крайней мере, качественно) степень риска и наличия факторов риска. Показатели, содержащие в том или ином виде информацию об угрозах для мореплавания, ведении промысла или других видах деятельности, назовем *индикаторами риска*. Применение индикаторов риска имеет цель получения информации о ситуации на текущий момент времени и возможных угрозах в обозримом будущем. Особый интерес представляют опережающие индикаторы риска — показатели, свидетельствующие о наличии факторов риска. Например, снижение такого показателя, как уровень изоляции судового дизель-генератора, является предупреждением о риске выхода его из строя и возможного обесточивания судна. Следует отметить, что на сегодняшний день понятие «индикаторы риска» в мореплавании и океаническом рыболовстве не используется, соответственно отсутствует и систематизация индикаторов для целей управления рисками. Поэтому необходимо определить индикаторы риска, систематизировать их и внести соответствующую информацию в базу данных проектируемой системы.

На основе представленной ранее процессной модели определяется функциональная структура и формируется структурная модель управления рисками. Следует обратить внимание на то, что система управления рисками — это не бюрократическое образование. Отсутствует необходимость создавать под каждую функцию рабочие места и отделы. Важно, чтобы процессы оценки и управления рисками были реализованы. Понятно, что в очень крупной корпорации или судоходной компании нет проблемы создать специализированное подразделение, но на сегодняшний день береговой персонал судоходных / рыбопромысловых компаний небольшой, а рисками управлять надо и безопасностью заниматься необходимо. В этой связи можно предложить три варианта организации работ по управлению рисками.

Первый вариант — создание условно-постоянных структур, когда, например, руководители службы мореплавания, механико-судовой службы и службы добычи образуют условно-постоянную группу оценки и управления рисками и занимаются выполнением функций, определенных системой, принятой в Международном кодексе по управлению безопасностью эксплуатации судов и предотвращением загрязнения — МКУБ (ISM CODE).

Второй вариант — передача функций оценки и управления рисками на аутсорсинг (например, региональному информационно-аналитическому логистическому центру).

Первый вариант предполагает:

– наличие в штате компании как минимум одного высококвалифицированного специалиста, имеющего подготовку в области управления рисками;

– наличие и постоянное пополнение базы данных по аварийности и рискам;

– наличие методики оценки и управления рисками, а также расчета допустимого уровня рисков.

Преимущества второго варианта:

– компания избавляется от необходимости выполнения сложных действий по управлению рисками, формирования баз данных, мониторинга и т. д.;

– экономия на издержках, так как выполнение некоторых функций своими силами обходится дороже (например, формирование баз данных).

Основным недостатком аутсорсинга управления риском является его внешний характер, что порождает сомнения в представленных результатах. Предлагаемые меры по управлению риском могут восприниматься как нечто чуждое, не соответствующее реальным потребностям рыбопромысловой компании, и управление рисками не будет эффективным.

На наш взгляд, создание условно-постоянной структуры управления рисками представляется наиболее продуктивным, так как профессионалы сами выполняют анализ, расчеты и принимают решения. Что касается формирования баз данных по аварийности и рискам, то этот вопрос можно решить на уровне Федерального агентства по рыболовству, т.е. создается централизованная база данных по аварийности и рискам при соответствующей структуре агентства. К этой базе данных должны иметь доступ все рыбохозяйственные организации и суда отрасли. В этом случае основная информационная проблема будет решена.

Третий вариант создания системы управления рисками — смешанный вариант условно-постоянной и частичного использования аутсорсинга. Этот вариант наиболее продуктивен для небольших компаний.

Формирование условно-постоянной организационной структуры системы управления рисками основано на создании «творческих коллективов». В рыбопромысловой / транспортной компании в обязательном порядке (согласно требованиям МКУБ) должен быть офицер, ответственный за организацию управления безопасностью. Также существуют специалисты / специалист механико-судовой службы, службы добычи, которые составляют ядро условно-постоянной структуры, осуществляющей функции оценки и управления рисками. В их функции входит также выполнение функций мониторинга, поддержание на современном уровне базы данных, а также разработка мероприятий по снижению уровня рисков.

На рис. 2 приведен пример такой организационной структуры. Рассмотрим более подробно представленную на рисунке структурную модель адаптивной системы управления рисками.

«*Суперсистема*» — это вышестоящая по иерархии структура управления, осуществляющая функции «идеолога» и контролирующего органа, с одной стороны. С другой стороны, функции суперсистемы должны включать оказание методической и ресурсной помощи рыбопромысловым компаниям, в том числе в области организации работы по оценке и управлению рисками.

«*Внешняя среда*» — это множество объектов и субъектов, с которыми рыбопромысловая компания, рыболовные и транспортные суда могут взаимодействовать прямо или косвенно. Внешняя среда может оказывать на рыболовные / транспортные суда и компании как позитивное, так и негативное влияние. Влияние факторов внешней среды следует изучать и принимать в расчет при оценке рисков и управлении рисками.

«*Источники информации*» — это любые источники, информация которых может быть полезной для решения задач управления рисками как в океаническом рыболовстве, так и при транспортировке сырья. Руководитель рыбопромысловой / судоходной компании как лицо, являющееся ответственным за деятельность компании в целом, осуществляет общее руководство, в том числе в области безопасности мореплавания и ведения промысла. Ключевыми структурами, реализую-

щими процессы оценки и управления рисками, являются службы мореплавания, механико-судовая и добычи, при этом специализированный отдел риск-менеджмента не создается, но в крупных компаниях может быть создан.

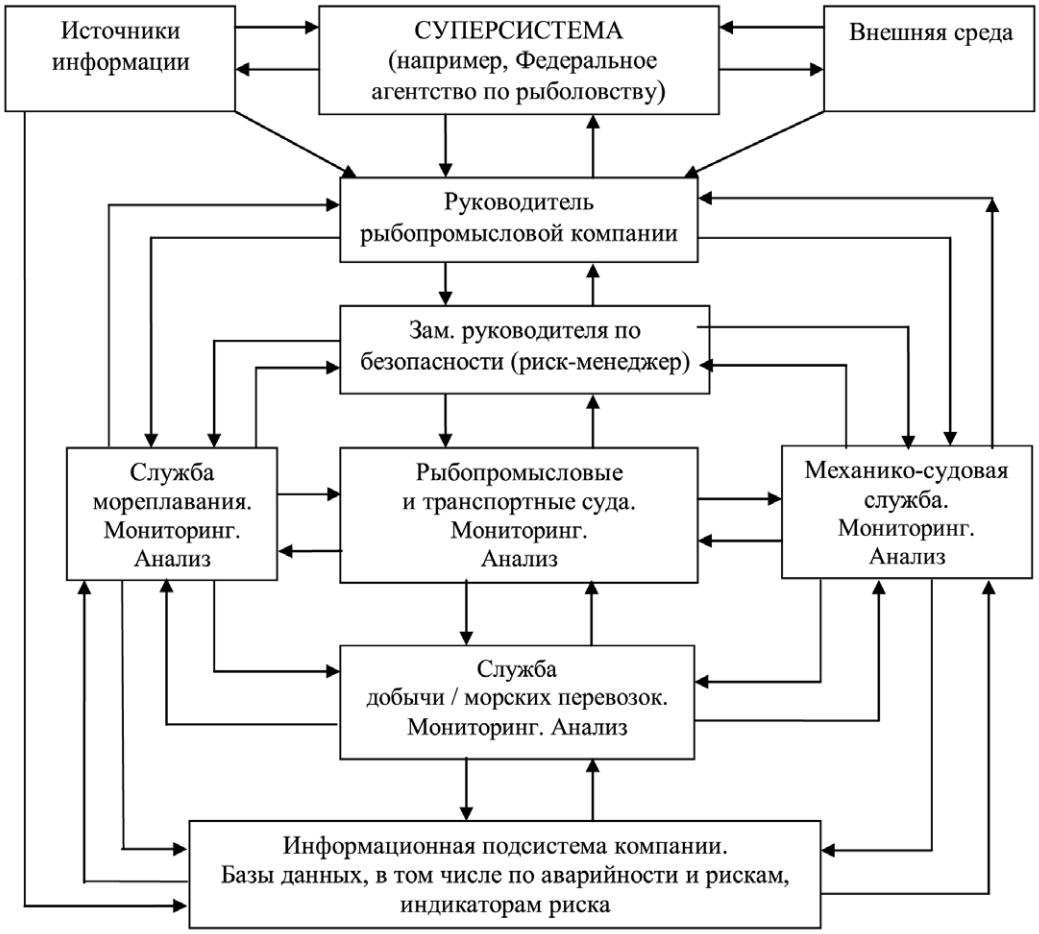


Рис. 2. Организационная структура системы управления рисками рыбопромысловой компании, основанная на принципе условно-постоянного функционального сотрудничества

Информационная подсистема компании включает базы данных, в том числе по аварийности и рискам, а также индикаторам риска. Алгоритм функционирования системы оценки и управления рисками приведен на рис. 3.

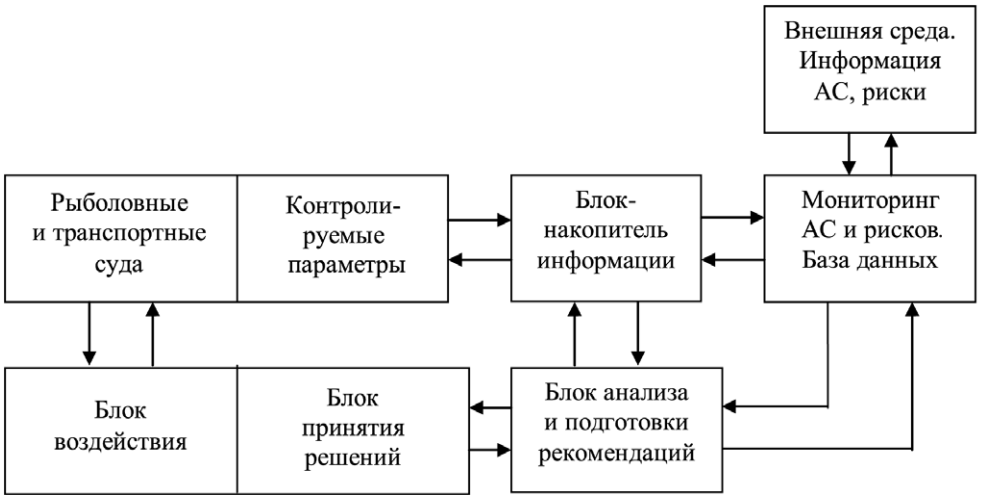


Рис. 3. Основные элемента системы управления рисками

Результаты проведенных исследований.

1. Определены методологические основы проектирования системы управления рисками в рыбопромысловых и судоходных компаниях, что является базисом для выполнения дальнейших проектных работ для конкретных компаний и заданной степени детализации.

2. Разработана адаптивная процессная модель системы управления рисками, на базе которой можно сформировать систему управления рисками для любого уровня иерархии.

3. Разработана структурная модель адаптивной системы управления рисками для уровня рыбопромысловой / судоходной компании и общая схема функционирования системы управления рисками.

4. Рассмотрены вопросы определения индикаторов риска и их значимость для обеспечения безопасности транспортного и рыбопромыслового флота.

5. Рассмотрены вариативные схемы организации работы по оценке и управлению рисками. Выбор той или иной схемы организации работы по управлению рисками зависит от производственного и интеллектуального потенциала компании, количества специалистов и их квалификации. Принципиальным является не выбор схемы организации, а организация эффективной работы по управлению рисками.

6. Перспективным направлением дальнейших исследовательских и проектных работ является создание автоматизированной системы управления рисками, что позволит реализовать решение практико-ориентированных задач управления рисками в океаническом рыболовстве и транспортировке сырья.

Список литературы

1. *Вяткин В. Н.* Управление рисками фирмы. Программы интегративного риск-менеджмента / В. Н. Вяткин. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 400 с.

2. *Гуральник Б. С.* Количественный учет рисков при буксировке СПБУ «А» Северным морским путем / Б. С. Гуральник // Организация и технология морских перевозок грузов: сб. науч. тр. — Калининград: Изд-во БГАРФ, 2009. — С. 34–43.

3. *Мойсеенко С. С.* Дифференциально-интегральный подход к моделированию процессов развития аварийных ситуаций в мореплавании и океаническом рыболовстве / С. С. Мойсеенко, В. П. Скрыпник, О. Г. Фаустова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 47–53.

4. *Топалов В. П.* Риски в судоходстве / В. П. Топалов, В. Г. Торский. — Одесса: Астропринт, 2007. — 368 с.

5. *Туркин В. А.* Применение теории нечетких множеств для оценки рисков возникновения аварий на морских судах / В. А. Туркин // Морской флот. — 2002. — № 3. — С. 16–18.

6. *Туркин В. А.* Управление безопасной эксплуатацией судов на основе анализа риска / В. А. Туркин // Безопасность жизнедеятельности. — 2003. — № 8. — С. 21–26.

7. *Фаустова О. Г.* Методика оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в мультимодальных перевозках / О. Г. Фаустова // Вестник Астраханского государственного технического университета. — Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 1. — С. 109–116.

8. *Kristiansen S.* Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis / S. Kristiansen. — Elsevier, 2010. — 508 p.

9. *Jin D.* A model of fishing vessel accident probability / D. Jin, H. L. Kite-Powell, E. Thunberg, A. R. Solow, W. K. Talley // Journal of Safety Research. — 2002. — № 33. — P. 497–510.

10. *Kobyliński L.* Risk analysis and human factor in prevention of CRG casualties / L. Kobyliński // Trans Nav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2009. — № 3 (4). — P. 443–448.

11. IMO Maritime Safety Committee: Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment («Временное руководство по применению формальной оценки безопасности»): MSC Circular 829. — London, 1997. — 45 p.

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

УДК 628.16

А. С. Курников,
д-р техн. наук, проф.;

Д. С. Мизгирев,
канд. техн. наук, доц.;

Е. А. Черепкова,
канд. техн. наук, преп.

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КАВИТАТОРА С ТОРОИДАЛЬНОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

THE CALCULATION OF HYDRODYNAMIC CAVITATOR WITH TOROIDAL MIXING CHAMBER

Одним из прогрессивных и эффективных процессов очистки жидкостей в последнее время является кавитация, которую можно получить искусственно в специальных аппаратах-кавитаторах. В статье предложена конструкция гидродинамического кавитатора с тороидальной камерой, как наиболее компактная и энергосберегающая. Указаны методы оценки эффективности кавитации: визуальный, акустический, фотоэлектрический, гидродинамический, химический, механический, технологический и радиоактивный. Проведен анализ существующих методов, который показал, что наиболее простым и в то же время достаточно точным является акустический. Выполнена оптимизация конструкции кавитатора по пяти факторам, к которым относятся: Ψ — эксцентриситет входного сопла, мм; L — расстояние между соплом и диффузором, мм; F_2/F_1 — отношение площадей выходного отверстия к входному камеры смешения; Δp — перепад давлений, кПа; T — температура воды, °C. *В результате экспериментальных исследований на специально разработанном стенде была получена математическая модель работы кавитаторов производительностью 1–13 м³/ч. Обработаны результаты методом корреляционно регрессионного анализа. На основании математической модели были определены оптимальные характеристики кавитаторов.*

One of the most progressive and effective processes for purifying liquids in recent times is cavitation, which can be obtained artificially in special apparatus-the cavitator. The paper proposed a design of hydrodynamic cavitator with toroidal chamber, as the most compact and energy saving. Specified methods of evaluating the effectiveness of cavitation: visual, acoustic, photo-electric, hydrodynamic, chemical, mechanical, technological and radioactive. The analysis of existing methods, which showed that the most simple and at the same time is sufficiently accurate acoustic. Performed design optimization of a cavitator on 5 factors, which include: Ψ is the eccentricity of the inlet nozzle, mm; L is the distance between the nozzle and the diffuser, mm; F2/F1 is the ratio of the area of the outlet to the inlet of the mixing chamber; Δp is the pressure drop, kPa; T is the water temperature, °C. *As a result of experimental studies on a specially designed stand was obtained mathematical model of the cavitator performance (1–13) m3/h. The processed results using correlation and regression analysis. On the basis of the mathematical model were determined the optimum characteristics of the cavitator.*

Ключевые слова: кавитатор, тороидальная камера смешения, плавательный бассейн.
Key words: cavitator, a toroidal mixing chamber, swimming pool.

ДЛЯ изучения процессов, происходящих в гидродинамическом кавитаторе при изменении его конструкции и параметров рабочих сред, необходимо выполнить предварительный расчет по определению размеров кавитатора с учетом соблюдения условий возникновения кавитации [1] – [5]. Согласно [5], гидродинамические устройства с тороидальной камерой смешения способны создавать кавитацию и стабильно функционировать в кавитационном режиме при низких значениях числа кавитации γ. При этом при схлопывании сферического пузырька в жидкости достигается максимальное давление 1,0 МПа и температура в каверне – до 4 000 °C. В соответствии с работой А. А. Рязанцева и Н. Б. Васильевой [4] рассмотрим схему гидродинамического кавитатора применительно к системе очистки воды плавательных бассейнов (СОВБ) —

рис. 1. Рабочий поток жидкости, проходя входное сопло *1*, поступает в камеру смешения *2*. При этом часть его поступает в тороидальную камеру, а вторая – проходит напрямую к входному отверстию диффузора *5*. В зоне, образованной стенкой внутреннего кольца *4* и тороидальной камерой, формируется область пониженного давления, которая обеспечивает подачу воздуха (газа) в камеру смешения через патрубок *3* и протекание вторичной искусственной кавитации.

Смещение входного сопла на величину Ψ, мм, обеспечивает поступление первой части потока внутрь камеры, что позволяет повысить время контакта транзитной струи с водоворотными областями, увеличивая при этом силу трения, закручивающую жидкость в полости кавитатора. Вследствие этого происходит снижение числа кавитации с образованием вихревого движения жидкости вдоль стенки камеры смешения и сужение потока за счет конструкции кольца, позволяющей создавать вакуум. При соударении набегающего рабочего потока с потоком газа в условиях пониженного давления и большой скорости движения происходит образование вторичной кавитации.

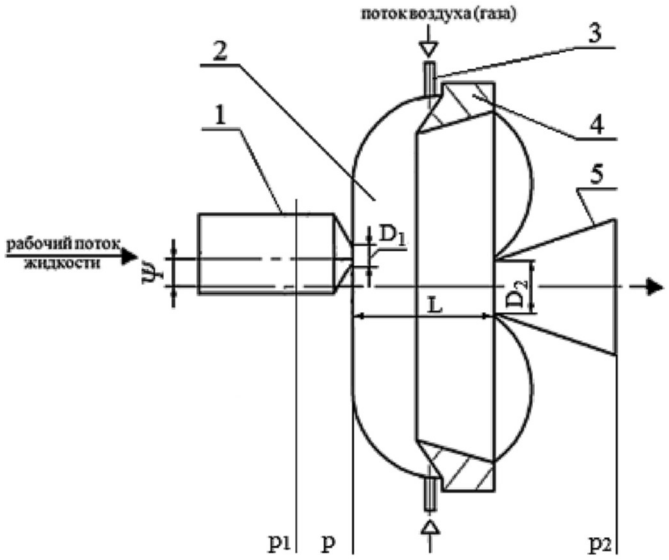


Рис. 1. Схема гидродинамического кавитатора с тороидальной камерой:
1 — входное сопло; *2* — камера смешения; *3* — патрубок подсоса воздуха (газа);
4 — внутреннее кольцо; *5* — диффузор

Расчет любого узла судовой системы начинается с определения размеров одного из основных элементов, например, с вычисления диаметра входного отверстия D_1, от которого зависит производительность кавитатора.

Определим площадь входного отверстия F_1, м, из уравнения производительности устройства, м^2:

$$F_1 = \frac{Q}{\mu\sqrt{2gH}}, \qquad (1)$$

где Q — производительности устройства, м^3/с; g — ускорение свободного падения, м/с^2; μ — коэффициент расхода. Принимаем μ = 0,65 [6]; H — напор перед кавитатором. С учетом работы кавитатора в судовых условиях принимаем H = 60 м.

В работах [2] – [5] при исследовании процесса возникновения кавитации получен диапазон скорости течения воды υ, который находится в пределах 16 … 24 м/с. В связи с этим необходимо осуществить проверку скоростного режима кавитатора:

$$\upsilon = \frac{Q}{F_1} = 16 \ldots 24 \text{ м/с}. \qquad (2)$$

Однако для развития и поддержания процесса кавитации необходимо также обеспечить соблюдение условия превышения скорости на выходе из устройства над скоростью входа в него.

Согласно исследованиям Т. Н. Витенько и Я. М. Гумницкого [7] установлено, что кавитационный режим сопровождается разрушением сплошности среды, а, следовательно, уменьшением плотности потока. Поэтому, в первом приближении, принимаем значение плотности выходящего потока, равное 500 кг/м^3, т.е. в два раза ниже плотности входящего (1000 кг/м^3). В связи с этим происходит увеличение расхода через выходное отверстие на то же значение.

Площадь выходного отверстия вычисляется относительно рекомендованного отношения площади сечений выходного и входного отверстий: $F_2/F_1 = 3$ [4].

Анализируя данные по площадям и объемам бассейнов на круизных пассажирских судах и в соответствии с требования СанПиН 2.1.2.1188-03 [9] к обязательной кратности водообмена в ванне [8], [9], производительность СОВБ для круизных пассажирских судов составляет 1 … 13 м^3/ч. Для стендовых испытаний принимаем минимальное и максимальное значения производительности, в результате чего будет выявлено возможное отсутствие «масштабного» эффекта. Независимо от производительности параметры оптимизации выбираем по одному из методов оценки эффективности кавитации, указанных в табл. 1 [3], [5].

Анализ существующих методов показывает, что наиболее простым и в то же время достаточно точным методом определения эффективности кавитации является акустический, а именно, давление в камере смещения $p(y)$.

Для расчета экспериментального образца кавитатора необходимо уточнить внешние параметры работы устройства, к которым относятся:

– давление перед кавитатором p_1, кПа — 450 … 600;

– давление после кавитатора p_2, кПа — 150;

– температура рабочей среды T, °С — 4 … 30.

В соответствии с принятыми предположениями и внешними условиями выполним расчет экспериментальных образцов кавитаторов производительностью 1 м^3/ч и 13 м^3/ч по формулам (1), (2):

– для 1 м^3/ч: $D'_1 = 4{,}0$ мм, $F'_1 = 1{,}24710^{-5}$ м, $\upsilon'_1 = 22{,}2$ м/с;

– для 13 м^3/ч: $D''_1 = 14{,}37$ мм, $F''_1 = 16{,}20610^{-5}$ м, $\upsilon''_1 = 22{,}3$ м/с.

Для изготовления кавитатора производительностью 1 м^3/ч принимаем диаметр входного отверстия $D_1 = 4{,}0$ мм. Исходя из значения соотношения площадей $F_2/F_1 = 3$, выбираем $D_2 = 7{,}0$ мм. По аналогии выбираем значение диаметров устройства производительностью 13 м^3/ч: $D_1 = 14{,}0$ мм и $D_2 = 42{,}0$ мм. Остальные размеры кавитаторов выражаются через соотношения между ними или конструктивно.

Согласно принятым округлениям диаметров входного отверстия кавитаторов, произведем уточнение скоростного режима по формуле (2): $\upsilon'_1 = 22{,}2$ м/с, $\upsilon''_1 = 23{,}5$ м/с. Все факторы, от сочетания которых зависит давление в камере смешения $p(y)$, делятся на две группы. К первой группе относятся конструктивные факторы, такие как эксцентриситет входного сопла Ψ, расстояние между соплом и диффузором L и отношение площадей выходного отверстия к входному отверстию камеры смешения F_2/F_1, а во вторую группу входят внешние условия протекания следующих процессов: перепад давления на кавитаторе Δp и температура среды T [1], [3], [7], [10]. Таким образом, оптимизация конструкции кавитатора производится по пяти факторам, к которым относятся (см. рис. 1): Ψ — эксцентриситет входного сопла, мм; L — расстояние между соплом и диффузором, мм; F_2/F_1 — отношение площадей выходного отверстия к входному камеры смешения; Δp — перепад давлений; $\Delta p = p_1 - p_2$, кПа; T — температура воды, °С.

Значения возможного варьирования указанных факторов приняты на основании работы А. А. Рязанцева, Н. Б. Васильевой [4] и с учетом конструкции входящих в кавитатор элементов (табл. 2), откуда видно, что для всех факторов интервалы возможного изменения невелики, поэтому можно предположить, что в области их определения зависимость величины $p(y)$ от факторов не будет противоречить линейным законам, а также распределению этой величины нормальному закону. Следовательно, функцию $p(y)$ можно приблизительно представить в виде ряда Тейлора:

$$p(y) = p_0 + a_1(\Psi - \Psi_0) + a_2(L - L_0) + a_3(F_2/F_1 - (F_2/F_1)_0) + a_4(\Delta p - \Delta p_0) + a_5(T - T_0) + \\ + a_1a_2(\Psi - \Psi_0)(L - L_0) + a_1a_3(\Psi - \Psi_0)\,(F_2/F_1 - (F_2/F_1)_0) + \ldots . \qquad (3)$$

Таблица 1

Методы оценки эффективности кавитации

№ п/п	Наименование	Описание	Преимущества	Недостатки
		Прямые		
1	Визуальные	Фото-, кино- и видеосъемка кавитационных образований	Визуальное фиксирование процесса	Трудоемкость, требует специализированное оборудование, высокая стоимость
2	Акустические	Измерение давления в камере смешения (всасывающая способность), ультравибрация, замер шума	Легко поддается автоматизации, затраты ручного труда минимальны, возможность обработки больших объемов воды	Требует специализированное оборудование, более высокая энергоемкость
		Косвенные		
3	Фотоэлектрические	Регистрация сонолюминесценции при кавитации	Визуальное фиксирование процесса	Трудоемкость, требует специализированное оборудование, высокая стоимость
4	Гидродинамические	Изменение гидродинамических параметров потока жидкости, связанных с интенсивностью кавитации	Легко поддается автоматизации, затраты ручного труда минимальны	Требует специализированное оборудование, более высокая энергоемкость
5	Химические	Исследование изменения массы, концентрации или объема хим. реагентов за счет звукохимических реакций в кавитационном поле	Удобен при экспресс-определении	Быстро теряют активность, затраты ручного труда, необходимость в реагентном хозяйстве
6	Механические	Измерение величины кавитационной эрозии, которую обычно выражают через убыль веса образцов в виде алюминиевых цилиндриков или через площадь вырывов в алюминиевой фольге	Затраты ручного труда минимальны	Требует спец. оборудование, более высокая энергоемкость, длительное время фиксирования процесса
7	Технологические	Изменения качественных показателей обрабатываемой среды, связанных с интенсивностью кавитации	Легко поддается автоматизации, затраты ручного труда минимальны	Требует спец. оборудование, более высокая энергоемкость, требует совмещение методов для фиксирования эффективности процесса, высокая стоимость
8	Радиоактивные	Пропускание гамма-лучей через объект исследования	Точный метод исследования, для широкого диапазона плотностей жидкостей	Требует спец. оборудование и специальные средства защиты персонала, более высокая энергоемкость. Опасный для здоровья человека метод

Таблица 2

Значения варьирования факторов при проведении экспериментального исследования

Наименование фактора	Производительность кавитатора, м³/ч	
	1,0	13,0
Эксцентриситет входного сопла Ψ, мм	1 … 3	3,5 … 8,5
Расстояние между соплом и диффузором L, мм	17 … 23	50 … 70
Отношение площадей выходного отверстия к входному камеры смешения F_2/F_1	2 … 4	2 … 4
Перепад давлений Δp, кПа	310 … 450	310 … 450
Температура воды T, °С	4 … 30	4 … 30

Определив экспериментально величину $p(y)$, можно оценить степень влияния на нее факторов, указанных в табл. 2. На основании расчетов и интервалов варьирования параметров кавитатора в лаборатории «Металлорежущего оборудования» кафедры «Технологии конструкционных материалов и машиноремонта» ВГУВТ в 2013 г. были изготовлены два опытных кавитатора, конструкции которых позволяют изменять значения факторов Ψ, L и F_2/F_1 в соответствии с данными табл. 2. Внешний вид конструктивных элементов гидродинамических кавитаторов приведен на рис. 2. При проведении экспериментальных исследований были рассмотрены только пропорциональные изменения всех факторов, оказывающих влияние на параметры кавитатора. Это обеспечило геометрическое подобие устройства, что позволит распространить выводы, полученные в результате экспериментов, на весь их ряд, т. е. для производительности 1 ... 13 м³/ч.

а) б)



Рис. 2. Внешний вид конструктивных элементов гидродинамических кавитаторов:
а — детали устройства (входное и выходное сопло, внутреннее кольцо, полукамеры);
б — гидродинамический кавитатор в сборе без корпуса

По завершении экспериментальных исследований кавитаторов и математической обработки полученных данных были составлены уравнения регрессии по $p(y)$ для производительности 1 м³/ч и 13 м³/ч. Расхождение между полученными результатами по уравнениям регрессии не превышает 5 %, что свидетельствует об отсутствии масштабного эффекта, поэтому окончательно составлено общее уравнение регрессии для кавитаторов производительностью 1 – 13 м³/ч:

$$p(y) = -209{,}800 + 0{,}779\,\Psi + 0{,}900\,L + 1{,}794\,\Delta p + 64{,}015\,F_2/F_1 + \\ + 0{,}305\,\Psi\Delta p - 2{,}695\,LF_2/F_1 - 0{,}446\,\Delta p\,F_2/F_1. \quad (4)$$

В ходе проведения экспериментальных исследований были получены оптимальные характеристики кавитатора для производительности 1 м³/ч и 13 м³/ч (табл. 3).

Таблица 3

Оптимальные характеристики гидродинамического кавитатора 1 м³/ч и 13 м³/ч

Признак оптимизации	Значение параметра $p(y)$, кПа	Значение факторов			
		Ψ, мм	L, мм	F_2/F_1	Δp, кПа
Минимизация $p(y)$, кПа	30,069	1,0 / 3,5	17,0 / 50,0	4,0	450,0

В ходе проведения многофакторных экспериментов был зафиксирован процесс нагревания обрабатываемой воды в кавитаторе. Для установления зависимости степени нагрева жидкости от изменения перепада давления было проведено третье экспериментальное исследование на разработанном стенде. Установлено, что эжекция воздуха увеличивает температуру воды по сравнению с работой кавитатора без воздуха. Следует отметить, что дополнительный ввод газа в камеру смешения кавитатора резко уменьшает разрушения пристеночных поверхностей. Кроме того, кавитатор выполняет одновременно четыре функции: смесителя, устройства для дезинфекции жидкости, нагревателя и насоса.

Выводы

1. На основании проведенных экспериментальных исследований гидродинамических кавитаторов производительностью 1 м^3/ч и 13 м^3/ч составлены математические модели, описывающие влияние пяти факторов (Ψ, L, F_2/F_1, Δp и T) на процесс кавитации в камере смешения. Расхождение между полученными математическими моделями работы кавитаторов производительностью 1 м^3/ч и 13 м^3/ч не превышает 5 %, что свидетельствует об отсутствии *масштабного эффекта*.

2. Среднее значение R^2 составляет 95,0 %, что свидетельствует о высокой адекватности полученной математической модели работы кавитатора.

3. В процессе работы гидродинамического кавитатора происходит нагрев обрабатываемой жидкости, что позволяет исключить из системы электронагреватель в теплый период времени.

Список литературы

1. *Хитерхеева Н. С.* Кавитационные аппараты: монография / Н. С. Хитерхеева. — Улан-Удэ: Изд-во Бурятского гос. ун-та, 2009. — 157 с.

2. *Исаков А. Я.* Кавитация в перемешивающих устройствах: монография / А. Я. Исаков, А. А. Исаков. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2006. — 206 с.

3. *Махров В. П.* Гидродинамика кавитационных течений, формируемых внешними гидродинамическими особенностями / В. П. Махров. — М.: Изд-во МАИ, 2011. — 158 с.

4. *Рязанцев А. А.* Окисление нитрофенола в воде с использованием гидродинамической кавитации / А. А. Рязанцев, Н. Б. Васильева, А. А. Батоева // Химия в интересах устойчивого развития. — Новосибирск, 2007. — Т. 15. — № 6. — С. 715–720.

5. *Федоткин И. М.* Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности: в 2 ч. / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. — Киев: ОКО, 2000. — Ч. 1. — 898 с.

6. Синтех [Электронный ресурс] // Ртутные лампы среднего давления НОК/НТК/НТQ. — Режим доступа: http://sentech-medical.ru/files/tuv-lamps.pdf (дата обращения: 15.03.2015).

7. *Витенько Т. Н.* Механизм активизирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т. Н. Витенько, Я. М. Гумницкий // Химия и технология воды. — 2007. — Т. 29. — № 5. — С. 422–432.

8. *Черепкова Е. А.* Основы проектирования плавательных бассейнов на судах / Е. А. Черепкова, А. С. Курников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 107–115.

9. Проектирование, строительство и эксплуатация жилых зданий, предприятий коммунально-бытового обслуживания, учреждений образования, культуры, отдыха, спорта. Плавательные бассейны. Гигиенические требования к устройству, эксплуатации и качеству воды. Контроль качества: СанПиН 2.1.2.1188-03.2.1.2. — Введ. 1.06.2003 .— М.: ИИЦ Минздрава России, 2003.—15 с.

10. *Решняк В. И.* Регулирование эксплуатационного и аварийного загрязнения окружающей среды на объектах водного транспорта / В. И. Решняк, З. Юзвяк, А. Г. Щуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1. — С. 85–90.

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

УДК 504.4.054: 502.4

В. С. Наумов,
д-р техн. наук, проф.;

О. С. Нестерова,
асп.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЗОН ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ

ASESSMENT OF THE PROBABILITY OF POLLUTION OF ENVIRONMENTALLY SENSITIVE AREAS INTERNAL WATERWAYS OIL AND OIL PRODUCTS

В статье выполнена оценка вероятности возникновения загрязнения нефтью зон экологически чувствительных районов (водозаборных сооружений и особо охраняемых природных территорий). В частности, рассматривается участок реки Верхней Волги в пределах Нижегородской области, на котором располагается 13 водозаборных сооружений и 10 особо охраняемых природных территорий, нуждающихся в охране санитарно-защитных зон. В данной работе выполнен расчет вероятности загрязнения для каждого из этих объектов. Для определения достижения разлива нефти зон санитарной защиты чувствительных районов проведено моделирование сценариев разливов нефти, в ходе которых определены коэффициенты достижения зон разливов. Определена максимальная вероятность загрязнения чувствительных зон и построены диаграммы, по результатам которых выявлены уровни риска влияния на окружающую среду и население.

In article evaluated assessment of probability of emergence of pollution is carried out by oil of zones of ecologically sensitive areas (water intake works and especially protected natural territories). In particular the site of the Upper Volga River within the Nizhny Novgorod Region is considered, which is 13 water intake works and 10 especially protected natural territories needing protection sanitary protective zones. In this work calculation of probability of pollution for each of these objects is made. For definition of achievement of oil spill of zones of sanitary protection of sensitive areas were carried out modeling of scenarios of oil spills during which coefficients of achievement of zones are defined by floods. The maximum probability of pollution of sensitive zones is defined and charts, by results which risk levels of influence on environment and the population are revealed are constructed.

Ключевые слова: разлив нефти, нефтяное загрязнение, водозаборные сооружения, аварии судов, особо охраняемая природная территория, чувствительные районы.

Key words: oil spills, oil pollution, water intake works, accidents of ships, specially protected natural territories, sensitive areas.

Введение

Аварии транспортных судов на внутренних водных путях происходят достаточно часто из-за ошибок командного состава, невыполнения требований безопасности судоходства, неудовлетворительного состояния водного пути, а также неблагоприятных погодных условий (шторм, туман и др.). Каждая авария может привести к аварийному разливу нефти и нефтепродуктов в реку. При разливах нефти происходит интенсивное загрязнение окружающей среды. Наиболее важными объектами экологической защиты, подвергающимися влиянию разливов, являются экологически чувствительные районы, а именно водозаборные сооружения (ВЗ) и особо охраняемые природные территории (ООПТ). Загрязнение нефтью этих районов может привести к истощению питьевых ресурсов, исчезновению мест обитания рыб, загрязнению среды обитания птиц и животных. В данной работе решается задача оценки уровня риска загрязнения нефтью экологически чувствительных районов при транспортных происшествиях судов. Для оценки уровня риска выполнен расчет вероятности загрязнения нефтью в акватории реки Волги в пределах Нижегородской области, где располагается тринадцать водозаборных сооружений и десять особо охраняемых природных территорий [1].

Основная часть

Для расчета вероятности возникновения загрязнения нефтью и нефтепродуктами экологически чувствительной зоны, согласно теореме умножения вероятностей, формула примет вид [2]:

$$P_{\text{загр}} = P_{\text{ТП}} \cdot P_{\text{ТП тип}} \cdot P_{\text{ТП разл}} \cdot P_{\text{сцен}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ТП}}$ — вероятность возникновения транспортного происшествия (ТП); $P_{\text{ТП тип}}$ — вероятность того, что в транспортном происшествии участвует судно определенного типа; $P_{\text{ТП разл}}$ — вероятность возникновения разлива нефти при транспортном происшествии; $P_{\text{сцен}}$ — вероятность реализации сценария загрязнения нефтью и нефтепродуктами в очаге аварийности.

Вероятность возникновения транспортного происшествия находим по формуле

$$P_{\text{ТП}} = \frac{(\lambda T)^m}{m!} e^{-\lambda T}, \quad (2)$$

где T — период, в течение которого необходимо рассчитать вероятность возникновения транспортного происшествия (принимаем равным 1 год); m — количество событий за данный интервал времени T (так как возникновение события транспортного происшествия на участке реки маловероятно, принимаем $m = 1$); λ — средняя интенсивность потока аварий на выбранном участке реки, которую легко вычислить для некоторой совокупности объектов, если известна статистика транспортных происшествий за достаточно длительный промежуток времени, используя следующую формулу:

$$\lambda = \frac{n}{t}, \quad (3)$$

где $t = 30$ лет — период рассмотрения (1980 – 2010 гг.); n — число транспортных происшествий на участке реки за период рассмотрения.

Так как объемы и процессы распространения нефти при моделировании сценариев разлива зависят от типа судна, была рассчитана вероятность того, что в транспортном происшествии участвует судно определенного типа: наливного или неналивного. Эта вероятность на реке Волге, на основе статистических данных по аварийности, была определена по формуле

$$P_{\text{ТП тип}} = \frac{n}{N}, \quad (4)$$

где n — количество транспортных происшествий с данным типом судов на реке; N — общее количество транспортных происшествий на реке.

Для оценки вероятности разлива нефти или нефтепродуктов при транспортном происшествии $P_{\text{ТПразл}}$ использованы статистические данные, базирующиеся на статистике ИМО [3], согласно которой частота аварий составляет для морей с интенсивным судоходством: 5,4 на 106 миль — при посадке на мель; 1,9 на 106 миль — при столкновении; 0,48 на 106 миль — при повреждении конструкции; 0,063 на 106 миль — при пожаре, взрыве. Исходя из того, что на реках применяют танкеры с двойной конструкцией корпуса, в расчетах используется статистические данные по разливу нефти для двухкорпусных танкеров.

Вероятность разлива нефти при авариях однокорпусных и двухкорпусных танкеров приведена в табл. 1.

Таблица 1

Вероятность разлива нефти при авариях двухкорпусных танкеров

$P_{\text{разл / авар}}$	$P_{\text{разл}} > 100$ т	$P_{\text{разл}} = 50$ — 100 т
Посадка на мель	0,03	0,09
Столкновения	0,03	0,09
Повреждение конструктивных элементов	0,05	0,09
Пожар, взрыв	0,1	0,09

Вероятность реализации сценария при разливе нефти и нефтепродуктов определялась в соответствии с теоремой умножения вероятностей совместного появления нескольких событий по формуле

$$P_{\text{сцен}} = P_{\text{гидр.реж}} \cdot P_{\text{н/п}} \cdot \omega_{n,j,k} \cdot k. \quad (5)$$

Здесь $P_{\text{гидр.реж}}$ — вероятность появления гидрологического режима реки (в работе рассматривается только режим межени); $\omega_{n,j,k}$ — среднегодовая совместная повторяемость или совместная вероятность скорости и направления ветра, рассчитанная исходя из данных Гидрометцентра; k — коэффициент, который определяется из условия достижения разлива нефти зоны ВЗ или ООПТ. Если разлив достиг зоны, то $k = 1$, если не достиг, то $k = 0$.

Вероятность появления гидрологического режима реки $P_{\text{гидр.реж}}$ определялась с учетом аварийности судов на реке Волге за период 1980 – 2010 гг. по формуле

$$P_{\text{гидр.реж}} = \frac{n_{\text{гидр.реж}}}{N}, \quad (6)$$

где $n_{\text{гидр.реж}}$ — количество транспортных происшествий на реке в межень; N — общее количество транспортных происшествий на реке; $P_{\text{н/п}}$ — вероятность появления данного вида нефтепродукта (мазут или дизельное топливо).

Для нефтеналивных судов появление разлива мазута или дизельного топлива принималось в качестве равновероятного события, поэтому вероятность появления нефтепродукта $P_{\text{н/п}} = 0{,}5$. Для неналивных судов возможен только разлив дизельного топлива, поэтому вероятность появления нефтепродукта $P_{\text{н/п}} = 1$.

Для определения достижения разлива нефти зон санитарной защиты чувствительных районов использован программно-аппаратный комплекс PISCES II «Система моделирования и анализа аварий, связанных с загрязнением окружающей среды», установленный в учебно-тренажерном центре по управлению кризисными ситуациями ВГАВТ [4], [5]. На этом комплексе проведено моделирование сценариев разливов нефти (рис. 1), в ходе которого задавались исходные данные об источнике разлива (место, тип нефтепродукта, объем и вид разлива) и характеристики погодных условий (скорость ветра, скорость течения, волнение), характерные для данного участка реки. При выполнении данной работы использовалась точечная модель разлива — задавались масса нефти и координаты разлива, а также подробный уровень детализации, учитывающий процессы, происходящие в нефтяном пятне, и процессы его взаимодействия с окружающей средой.

При моделировании был учтен гидрологический режим межени, рассмотрены два типа нефтепродукта: мазут и дизельное топливо, и приняты скорость ветра, температура воды, температура воздуха в двух значениях: наиболее вероятные и максимально возможные [6], [7]. Высота волны для водоема разряда «Р» принималась равной 0 м (совместно с наиболее вероятной скоростью ветра) и 1,2 м (совместно с максимально возможной скоростью ветра). Отдельно рассматривались разливы от наливных судов и судов, относящихся к другим видам флота (неналивные суда), поскольку тип судна определяет объем разлива. Максимально возможный разлив для наливного судна определяется 50 %-й максимальной грузоподъемностью наливного судна на реке Волге — 320 м^3 или 275 т (при плотности топлива 0,86) и 304 т (при плотности топлива 0,95). Максимально возможный разлив нефтепродуктов для судов других видов флота для условий межени на реке Волге принимается по наибольшему запасу топлива и смазки у неналивных теплоходов на реке Волге — 108,5 т.

Дальнейшее комбинирование исходных данных позволило выделить группы сценариев. Количество сценариев в группе принималось равным восьми (количество рассмотренных направлений ветра). Необходимость расчета параметров нефтяного загрязнения для такого количества направлений ветра вызвана значительными трудностями априорного определения наиболее опасного ветра с точки зрения распространения нефтяных полей, что обусловлено большой извилистостью реки Волги.

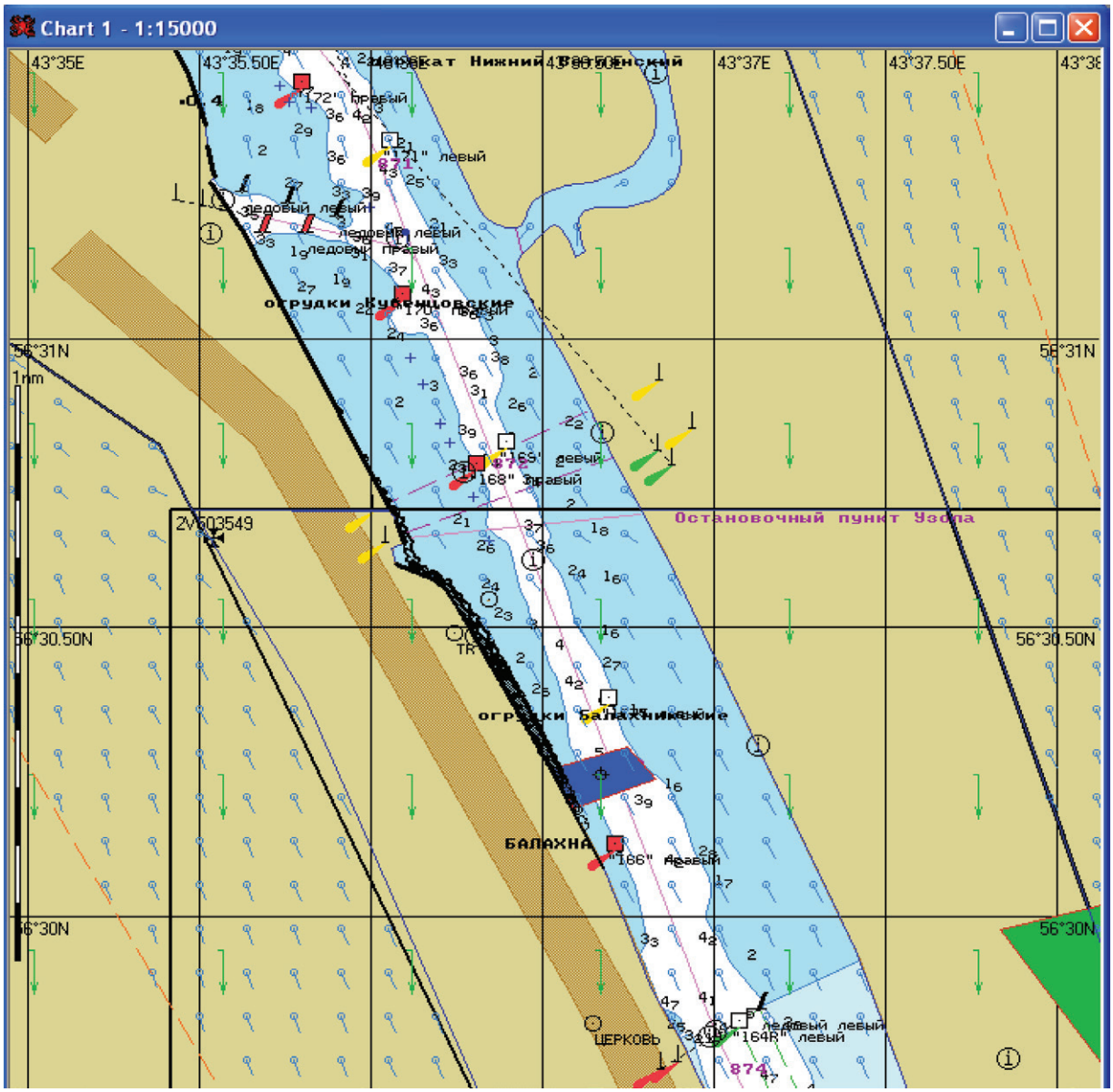


Рис. 1. Результаты моделирования загрязнения нефтью водозаборного сооружения 873 км реки Волги (синим цветом отмечен первый круг зоны санитарной защиты водозабора)

Моделирование разливов нефти было выполнено от семи источников — очагов аварийности, которые определялись в результате статистического анализа транспортных происшествий, произошедших в Волжском бассейне за период 1980 – 2010 гг. [8], [9]. Выбор чувствительных районов из общего списка для проведения моделирования разливов нефти обусловлен близостью их расположения к очагам аварийности [1]. Всего было выбрано шесть ВЗ и четыре ООПТ. Таким образом, общее количество смоделированных сценариев в условиях межени на реке Волга составляет 336 сценариев

В качестве примера приведена таблица расчета с максимальными полученными вероятностями возникновения загрязнения нефтью и нефтепродуктами — зоны ВЗ (912 км) при аварии нефтеналивного судна в очаге аварийности 911,7 км и зоны ООПТ (874 – 899 км) при аварии неналивного судна в очаге аварийности 875,5 км (табл. 2). Также была рассчитана вероятность возникновения загрязнения нефтью и нефтепродуктами от очагов аварийности зоны ВЗ на 812,5 км, 873 км, 894 км, 899 км, 910 км, 912 км и зон ООПТ на 820 – 824,5 км, 861 – 867 км, 874 – 899 км, 956 – 962 км реки Волги [1].

Таблица 2

Вероятность возникновения загрязнения нефтью и нефтепродуктами при аварии неналивного судна

Вероятность возникновения ТП $P_{ТП}$, 1/год	Вероятность, что в ТП участвует судно определенного типа $P_{ТП(тип)}$	Вероятность возникновения разлива нефти при ТП, $P_{ТП(разл)}$	Вероятность появления гидрологического режима $P_{гидр.реж}$	Вероятность разлива нефтепродукта $P_{н/п}$	Скорость и направление ветра. Среднегодовая совместная повторяемость скорости и направления ветра $\omega_{n,j,k}$		Коэффициент достижения разлива, k	Вероятность загрязнения зоны ВЗ $P_{загр} \cdot 10^{-4}$, 1/год
1	2	3	4	5	6		7	8
Зона водозаборного сооружения (912 км) в очаге аварийности 911,7 км								
0,3677	0,848	0,09	0,68 (межень)	1 (диз. топливо)	0 – 3,7 м/с	Северный ($2{,}586 \cdot 10^{-2}$)	1	4,935
						Северо-восточный ($10{,}603 \cdot 10^{-2}$)	1	20,234
						Восточный ($14{,}568 \cdot 10^{-2}$)	1	27,800
						Юго-восточный ($19{,}998 \cdot 10^{-2}$)	1	38,162
						Южный ($15{,}947 \cdot 10^{-2}$)	1	30,432
						Юго-западный ($15{,}947 \cdot 10^{-2}$)	1	30,432
						Западный ($6{,}293 \cdot 10^{-2}$)	1	12,009
						Северо-западный ($0{,}216 \cdot 10^{-2}$)	1	0,412
					3,7 – 17 м/с	Северный ($0{,}414 \cdot 10^{-2}$)	1	0,790
						Северо-восточный ($1{,}697 \cdot 10^{-2}$)	1	32,384
						Восточный ($2{,}332 \cdot 10^{-2}$)	1	4,450
						Юго-восточный ($3{,}20210^{-2}$)	1	6,110
						Южный ($2{,}553 \cdot 10^{-2}$)	1	4,872
						Юго-западный ($2{,}553 \cdot 10^{-2}$)	1	4,872
						Западный ($1{,}007 \cdot 10^{-2}$)	1	1,922
						Северо-западный ($0{,}034 \cdot 10^{-2}$)	1	0,065

Таблица 2
(*Окончание*)

Зона ООПТ (874 — 899 км) в очаге аварийности 875,5 км								
0,3569	0,848	0,09	0,68 (межень)	1 (диз. топливо)	0 – 3,7 м/с	Северный ($2{,}586 \cdot 10^{-2}$)	1	4,790
						Северо-восточный ($10{,}603 \cdot 10^{-2}$)	1	19,640
						Восточный ($14{,}568 \cdot 10^{-2}$)	1	26,984
						Юго-восточный ($19{,}998 \cdot 10^{-2}$)	1	37,042
						Южный ($15{,}947 \cdot 10^{-2}$)	1	29,539
						Юго-западный ($15{,}947 \cdot 10^{-2}$)	1	29,539
						Западный ($6{,}293 \cdot 10^{-2}$)	1	11,657
						Северо-западный ($0{,}216 \cdot 10^{-2}$)	1	0,400
					3,7 – 17 м/с	Северный ($0{,}414 \cdot 10^{-2}$)	1	0,767
						Северо-восточный ($1{,}697 \cdot 10^{-2}$)	1	31,434
						Восточный ($2{,}332 \cdot 10^{-2}$)	1	4,320
						Юго-восточный ($3{,}20210^{-2}$)	1	5,931
						Южный ($2{,}553 \cdot 10^{-2}$)	1	4,729
						Юго-западный ($2{,}553 \cdot 10^{-2}$)	1	4,729
						Западный ($1{,}007 \cdot 10^{-2}$)	1	1,865
						Северо-западный ($0{,}034 \cdot 10^{-2}$)	1	0,063

Анализ полученных данных по всем рассмотренным объектам показывает, что максимальная вероятность возникновения загрязнения нефтью и нефтепродуктами зоны водозаборного сооружения в очагах аварийности на реке Волге составляет $P_{загр} = 38{,}162 \cdot 10^{-4}$ 1/г, а зоны ООПТ составляет $P_{загр} = 37{,}042 \cdot 10^{-4}$ 1/г.

В российских нормативных документах [10], [11] установлена следующая градация для индивидуального риска (табл. 3).

Таблица 3

Классификация уровней риска

Уровень риска	Индивидуальный риск
$\leq 10^{-6}$	Безусловно приемлемый
10^{-6} — 10^{-4}	Предельно приемлемый
10^{-4} — 10^{-3}	Приемлемый для профессионалов, но неприемлемый для населения
$\geq 10^{-3}$	Неприемлемый риск

По данным табл. 2 были выявлены максимальные вероятности возникновения нефтяного загрязнения санитарно-защитных зон ООПТ и ВЗ вследствие аварии нефтеналивного и неналивного типа судов и по полученным данным построены диаграммы (рис. 2 и 3 соответственно). Также на диаграммы нанесены уровни риска в соответствии с табл. 3.

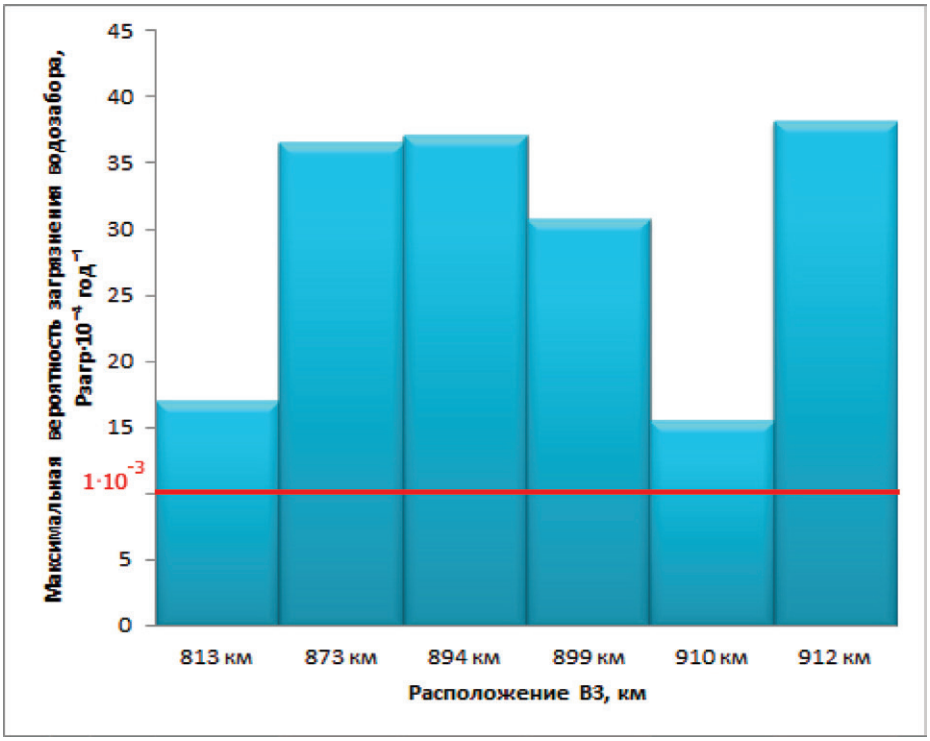


Рис. 2. Диаграмма максимальной вероятности загрязнения санитарно-защитных зон ВЗ внутренних водных путей нефтью и нефтепродуктами

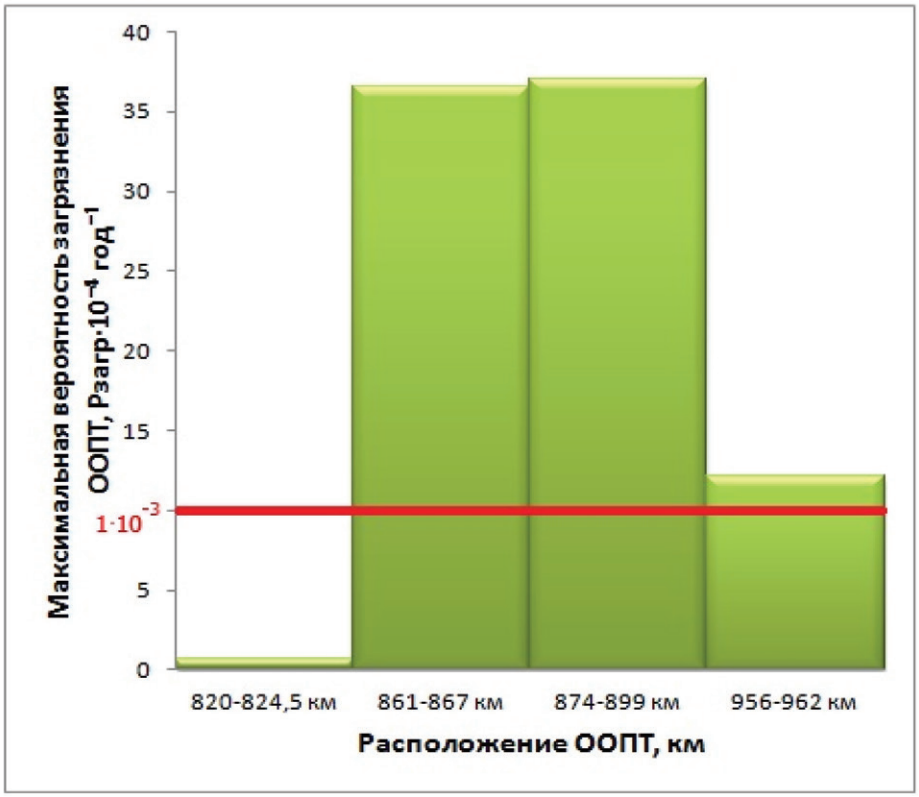


Рис. 3. Диаграмма максимальной вероятности загрязнения санитарно-защитных зон ООПТ внутренних водных путей нефтью и нефтепродуктами

Выводы

1. Выполнена оценка уровня риска нефтяного загрязнения санитарно-защитных зон ООПТ и ВЗ при аварии нефтеналивного и неналивного типа судов.

2. Установлено, что риск для всех рассматриваемых ВЗ превышает уровень 10^{-3} и в соответствии с классификацией уровня риска является неприемлемым риском. Для большинства рассматриваемых ООПТ уровень риска также находится на неприемлемом уровне, а значит, существует необходимость разработки мероприятий по устранению или снижению риска для экологически чувствительных районов внутренних водных путей.

Список литературы

1. *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.

2. *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 (20). — С. 97–104.

3. *Воробьев Ю. Л.* Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. — М.: Ин-октаво, 2005. — С. 106–107.

4. *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.

5. *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.

6. Научно прикладной справочник по климату СССР. — Сер. 3. Многолетние данные. — Ч. 1–6. — Вып. 29. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1992.

7. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РСФСР. — Т. 5: Река Волга. От Рыбинского гидроузла до Казани. — М.: ЦКФ ВМФ, 1988. — 45 с.

8. *Нестерова О. С.* Оценка смещения участков аварийности транспортных судов в районе Верхней Волги / О. С. Нестерова, А. Е. Пластинин // Материалы IV Межвуз. науч.-практ. конф. «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 15 – 16 мая 2013 г. — СПб: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — С. 286–290.

9. *Пластинин А. Е.* Определение очагов аварийности транспортных происшествий на внутренних водных путях / А. Е. Пластинин, А. Н. Бородин // Тринадцатая нижегородская сессия молодых ученых (Технические науки): мат. докл. — Н. Новгород: Изд-во О. В. Гладкова, 2008. — С. 84–85.

10. Критерии установления уровней минимального риска здоровью населения от загрязнения окружающей среды: метод. рекомендации. — МосМР 2.1.9.001-03. — М., М-во здравоохранения РФ, 2003.

11. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. — Руководство Р 2.1.10.1920–04 (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 05.03.2004). — М., М-во здравоохранения РФ, 2004.

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

УДК 338.512, 335.412.2

Л. Б. Белов,
канд. техн. наук, доц.

МЕТОД ABC (ACTIVITY-BASED COSTING) В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОПЕРАЦИОННЫХ ЗАТРАТ КОМПЛЕКСНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА

THE ABC METHOD (ACTIVITY-BASED COSTING) IN THE ALLOCATION OF OPERATING COSTS OF INTEGRATED TRANSPORTATION PROCESS

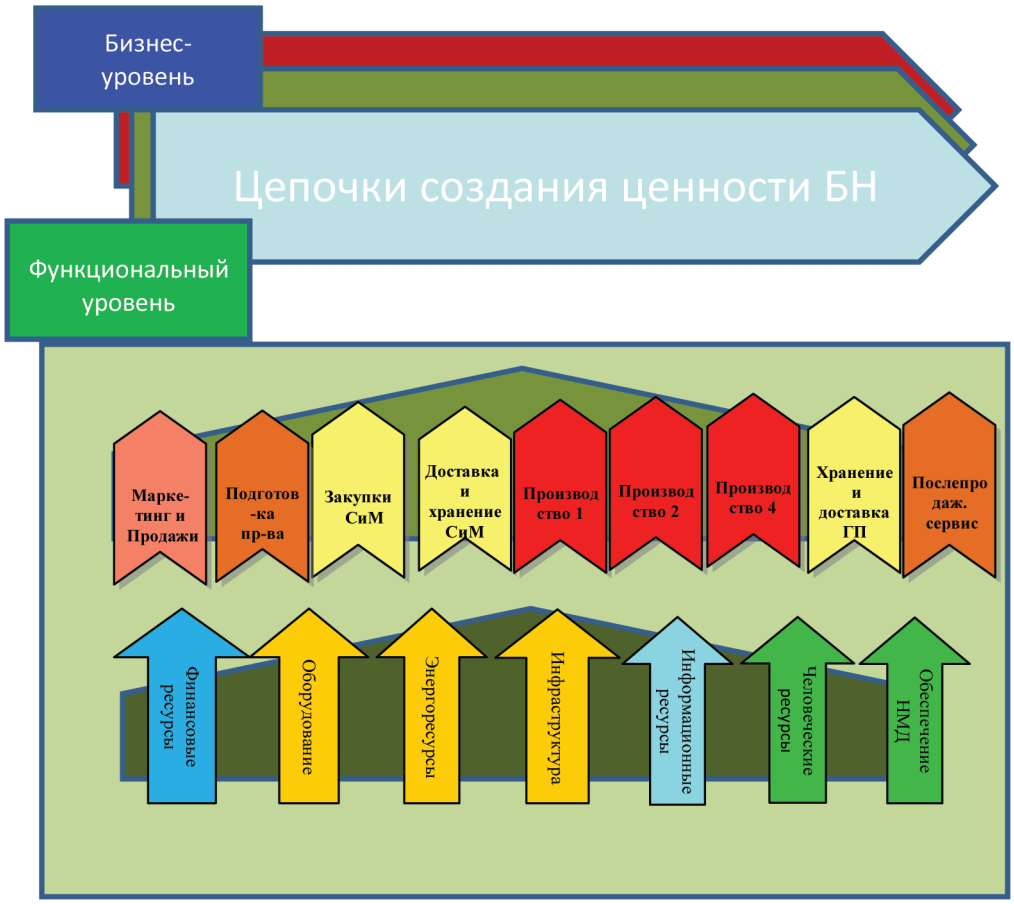
Рассмотрена одна из задач управленческого учета в системе контроллинга логистики предприятия – отнесение затрат на логистическую операционную деятельность на отдельные виды продукции и услуг, что необходимо для формирования адекватной калькуляции их себестоимости. Настоящая статья посвящена использованию метода ABC (Activity Based Costing) для отнесения операционных логистических затрат, связанных с операциями физического перемещения грузов, по видам деятельности и продуктам. Отнесение затрат возможно осуществить агрегированно — по Заказам поставщику, что имеет смысл в случае однозначной принадлежности Заказа к тому или иному продукту хозяйственной деятельности, либо сегрегированно — с накоплением долей логистических затрат от общих затрат на логистическую операцию, увеличивающих стоимость приобретения каждой входящей в Заказ товарной позиции. Для разнесения логистических затрат предложен обобщенный параметр, приведены апробированные автором методики и примеры их использования в логистике снабжения.

Considered one of the objectives of management accounting in the controlling of enterprise logistics is the allocation of logistics operating activities expenses to certain types of finished goods and services that is necessary to form an adequate estimate of their production costs. The present article is devoted to the use of ABC method (Activity Based Costing) for allocation of logistics operating expenses associated with the operations of the physical movement of goods, by type of activity and finished goods. It is possible to implement the allocation of costs in the aggregated manner — by the order to the supplier, which makes sense in the case of unambiguous belonging of the order to a certain product of economic activity, or in the segregated manner — with the accumulation of shares of logistics costs of the total cost of logistics operation, increasing the acquisition cost of each commodity item of the order. For the allocation of logistics' expenses a generalized setting is proposed, author-approved methods are given as well as the examples of their use in logistics of supply.

Ключевые слова: бизнес-направления, затраты, себестоимость, ABC-метод, логистика.
Key words: business-lines, expenses, costs, ABC-method, logistics.

ЦЕНТРАЛЬНЫМИ объектами управления на большинстве предприятий являются доходоприносящие *цепочки создания ценности*, или *бизнес-направления* (БН) [1], ориентированные на выбранные клиентские сегменты, и обслуживаемые так называемыми *функциональными системами* (ФС). Именно ФС непосредственно осуществляют операционную деятельность, физически реализуют производство и поставки продукции и услуг. К таким ФС системам относят следующие : «Продажи», «Производство», «Логистика», «Закупки». Руководителям бизнес-направлений принадлежит ключевая роль в проектировании ценностного предложения для своего сегмента (в том числе требования к уровню логистического сервиса), а также управлении портфелем заказов направления. Будем исходить из «сервисной модели» архитектуры предприятия.

Необходимо отметить, что создание ценности бизнес-направлениями осуществляется за счет комплексного логистического управления — планирования ресурсов и мощностей, с последующим оперативным управлением вызовом сервисов 1-го уровня, т. е. привлечением заказов, закупкой материально-технических ресурсов, транспортировкой и складской обработкой. При этом, конечно, необходимые технологические преобразования и сервис осуществляются коммерческими, логистическими и производственными ФС.



Бизнес-направления (БН), обеспечивающие путем комплексного управления цепочкой поставок предоставление продукции и услуг Заказчику (с требуемыми условиями поставки)

Сервисы 1-го уровня, функциональные системы (ФС), «физически» реализующие производство и поставки для внешних заинтересованных сторон

Сервисы 2-го уровня, обеспечивающие работу ФС цепочки поставок (сервисов 1-го уровня) необходимыми ресурсами и услугами

Рис. 1. Концепция построения *операционной модели* на основе «сервисного подхода» (SOA)

Рассмотрим «чистый» вариант, когда ни одна ФС не входит в БН и все они являются централизованными (корпоративными) сервисами, т. е. одновременно обслуживают все БН одними и теми же ресурсами, в том числе производственными и логистическими мощностями. В этом случае возникают следующие вопросы: *как разнести расходы по использованию ресурсов между бизнес-направлениями и какова должна быть система учета, чтобы это стало возможно.*

Использование логистических мощностей разными БН имеет существенную особенность — один и тот же ресурс может использоваться разными БН одновременно. Примером являются операции с консолидированным материальным потоком ряда БН и предшествующие им. Характерным примером подобной операции служит консолидированная транспортировка грузов (заказов) ряда БН в одной транспортной единице по одному маршруту.

По способу отнесения к результатам деятельности логистические затраты делят на *прямые* и *косвенные*. Прямыми затратами являются такие виды операционных затрат, которые в полном объеме могут быть отнесены к тому или иному конкретному результату операционной деятельности (например, издержки на транспортировку конкретного вида сырья, используемого для производства одной товарной позиции). Косвенными являются такие виды операционных затрат, которые в связи с комплексностью их осуществления не могут быть в полном объеме отнесены к тому или иному результату операционной деятельности и требуют предварительного распределения

(транспортировка и грузообработка многономенклатурных грузовых партий, состоящих из нескольких заказов). Основные недостатки традиционных методов учета затрат: некорректное распределение, недостоверная информация о рентабельности продуктов, «котловой метод» — нашли отражение в работе [2].

Отличия учета затрат по видам деятельности от традиционного рассмотрены в работе «Экономические основы логистики» (автор Н. К. Моисеева) и в работе [3]. В работе [4] отмечена неустоявшаяся терминология и путаница понятий: *функционально-стоимостный анализ* и *метод АВС* (*Activity Based Costing*). Причем авторы этой работы справедливо отмечают, что классический функционально-стоимостной анализ является методом технико-экономических исследований, который по широте охвата вопросов, эффективности при грамотном использовании существенно превосходит метод АВС в решении задач, стоящих перед предприятием.

Учет затрат по видам деятельности (*метод АВС*) – это метод распределения затрат между продуктами на основании вклада в процесс получения продукта затрат от непрямых видов деятельности, в том числе:

– от контроля качества;

– от перемещения грузов;

– от хранения грузов в системе логистики снабжения;

– от заказа товаров и др.

Методология АВС состоит в следующем [5]:

– продукция потребляет виды деятельности, а операционная деятельность — ресурсы;

– для распределения затрат выявляются факторы, формирующие затраты (носители издержек), при этом носители издержек (*cost drivers*) связывают конкретные виды деятельности с соответствующими затратами;

– на основе факторов, формирующих затраты, ресурсы распределяются между центрами производственной деятельности, а затем относятся на конкретные изделия.

Попытка систематизаций подходов к правильному определению носителей издержек приведена в работе [6]. Традиционно функционально-стоимостной учет применяется для отнесения косвенных затрат, в основном накладных расходов, на результаты деятельности [7] – [15]. Настоящая статья посвящена разнесению операционных логистических затрат.

Рассмотрим ситуацию на примере снабжения предприятия, в котором потоки материалов, сырья и комплектующих для разных БН обрабатываются консолидированно операциями входящей логистики. Консолидация происходит либо на уровне объединения потребностей разных БН в одном материальном ресурсе, либо на уровне формирования заказа поставщику. В любом случае для того, чтобы в такой ситуации распределить логистические затраты по результатам деятельности (продуктам), целесообразно рассчитать логистические затраты на обработку единицы каждой товарной позиции соответствующего кванта материалопотока и, таким образом, адекватно оценить затраты на приобретение каждой из товарных позиций. Далее, в соответствии со спецификацией состава изделия («*Bill of materials*») и учетной политикой предприятия, определяющей порядок списания материалов, вычисляется величина материальных затрат в себестоимости продукта в определенный период.

Очевидно, что под факторы, определяющие затраты на операционную обработку материалопотока, лучше всего подойдут его весообъемные характеристики. Возникает вопрос выбора одного фактора, который можно было бы использовать в расчетах. Здесь на помощь приходят методы, широко используемые контрагентами цепи поставок для расчета провозной платы на перевозку сборных грузов, предусматривающие использование объемного веса. На рис. 2 приведена тарифная сетка для расчета провозной платы при перевозке сборных грузов одного из немецких 3PL посредников по маршруту: регион D-63 (г. Ашаффенбург, Германия) — Хельсинки.

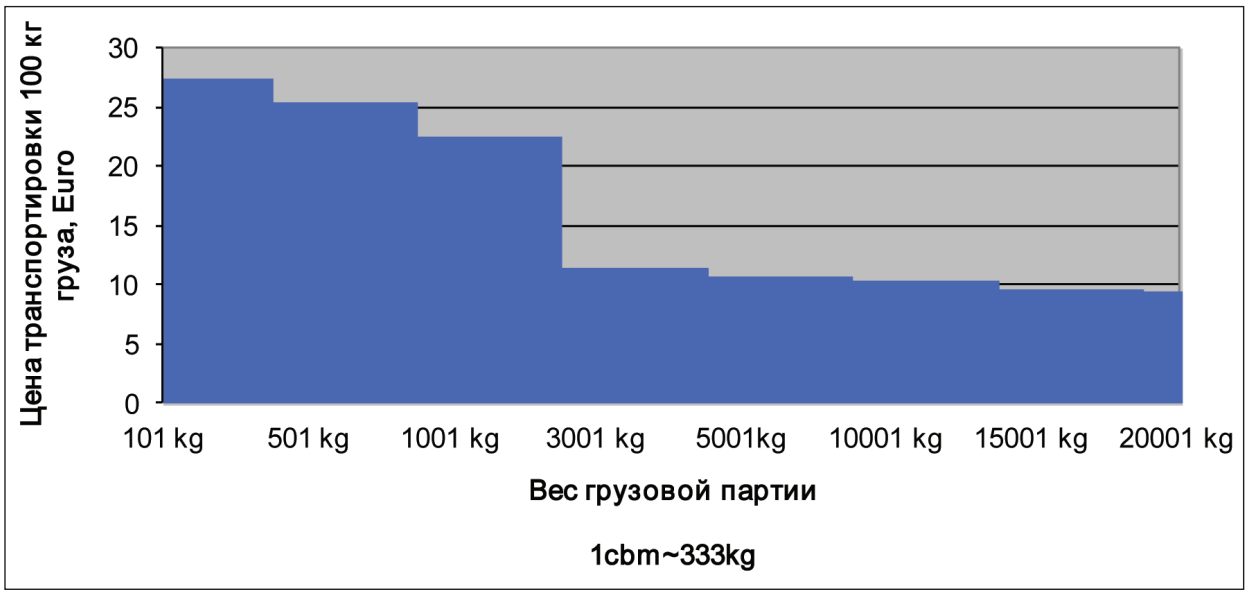


Рис. 2. Тарифы на автомобильную перевозку сборных грузов (пример)

Ввиду того, что грузы бывают *объемные* и *весовые*, 3PL посредник заинтересован в оптимальном использовании как грузоподъемности, так и грузовместимости транспортного средства, поэтому и провозная плата контрагентом выбирается по тарифной сетке как большая величина, рассчитанная по объемному или фактическому весу грузовой партии. Причем объемный вес — это объем груза, пересчитанный в весовые единицы с использованием специального коэффициента, величина которого зависит от соотношения грузоподъемности и грузовместимости транспортного средства. Посредниками 3PL в ЕЭС этот коэффициент принят в размере 333 кг /м^3, в том числе для операций грузопереработки и хранения (для авиационных международных перевозок он принят в размере 166,5 кг/м^3).

В данном случае для разнесения логистических затрат придется решать задачу обратного характера — по большему значению фактического или объемного веса разносить затраты на элемент материалопотока. Для этого необходимо ввести понятие *приведенный вес* как больший из двух видов веса: фактического и объемного. *Приведенный вес* будет носителем издержек, в соответствии с величиной которого будут разноситься операционные логистические затраты по элементам материалопотока.

Следует отметить, что коэффициент для пересчета объема в объемный вес можно сформировать также самостоятельно в зависимости от того, какие транспортные единицы используются для перевозки груза. За этот коэффициент может быть принята *удельная грузоподъемность транспортного средства* $К_{уд}$, рассчитываемая как отношение грузоподъемности транспортной единицы к ее полному объему:

$$К_{уд} = Грузоподъемность / Грузовместимость. \quad (1)$$

Если в транспортной единице плотность груза меньше удельной грузоподъемности транспортного средства, то его грузовместимость используется полностью, а грузоподъемность недоиспользуется. Если плотность груза больше удельной грузоподъемности, то полностью используется последняя, но недоиспользуется грузовместимость.

Рассмотрим подход к разнесению операционных затрат в логистике снабжения. Аналогичный подход к распределению затрат с целью их комплексной оптимизации можно применить для любых цепей поставок, управляемых одним и тем же юридическим лицом, в том числе и в дистрибуции. Изложение подхода к разнесению затрат приведено для ситуации, когда закупки материалов осуществляются на условиях «*склад продавца*» с полной оплатой всего заказа к моменту поставки. Заказы могут быть как однородными по составу, так и комбинированными, когда в состав заказа входят несколько товарных позиций в различных количествах.

Доставка товаров представляет собой последовательность операций, выполняемых с товарными партиями консолидированных и неконсолидированных заказов. Вопрос о необходимости и целесообразности консолидации поставляемых партий товаров входит в прерогативу подразделения логистики и, естественно, количество логистических операций, совершаемых с разными партиями товаров, может быть различным.

Партия содержит грузы нескольких неделимых заказов, каждый из которых, в свою очередь, включает ряд товарных позиций (артикулов) в том или ином количестве. Далее приведена модель для расчета фактического приращения затрат на приобретение единицы товара по выполнению каждой из логистических операций, т. е. разнесение затрат на операцию с партией консолидированных грузов по заказам и, далее, отнесение их на стоимость товаров, составляющих заказ.

Разнесение фактических затрат выполняется по результатам пооперационного учета реальных затрат на логистические операции с партиями товаров в базе данных логистических операций корпоративной информационной системы и продолжительность операций согласно приведенным далее методикам разнесения затрат.

Методика разнесения затрат на операцию с партией консолидированных грузов по заказам (по весообъемным характеристикам)

Пусть в консолидированной партии n заказов. Пусть i-й заказ обладает характеристиками: V_i, P_i, S_i , где V_i — объем, м^3; P_i — вес (кг); S_i — цена заказа (USD).

Затраты на операцию с консолидированной партией груза — $S_{\text{оп}}$.

Необходимо определить $S_{\text{ф}i}$ — затраты на операцию с i-м заказом.

Алгоритм

1. Для каждого заказа вычисляется его приведенный вес $P_{i\text{пр}}$ по правилу:

$$\text{если } P_i / V_i \le K,$$

$$\text{то } P_{i\text{пр}} = V_i K, \tag{2}$$

$$\text{иначе } P_{i\text{пр}} = P_i. \tag{3}$$

2. Затраты на операцию по i-му заказу вычисляются по формуле

$$S_{\text{ф}i} = \left(S_{\text{оп}} \Big/ \sum_{i=1}^{n} P_{i\text{пр}} \right) P_{i\text{пр}}. \tag{4}$$

Методика отнесения затрат на операцию с заказом на себестоимость товаров его составляющих (по весообъемным характеристикам)

Пусть заказ включает m товаров. Пусть j-й товар в заказе имеет характеристики V_j, P_j, S_j, N_j, где V_j — объем, м^3; P_j — вес, кг; S_j — цена единицы j-го товара, USD; N_j — количество единиц j-го товара в заказе. Затраты на операцию с заказом — $S_{\text{ф}}$.

Необходимо определить $S_{отj}$ — затраты на операцию с единицей j-го товара (приращение цены товара).

Алгоритм

1. Для каждого товара вычисляется приведенный вес $P_{j\text{пр}}$ единицы товара по правилу:

$$\text{если } P_j / V_j \leq K,$$

$$\text{то } P_{j\text{пр}} = V_j K, \tag{5}$$

$$\text{иначе } P_{j\text{пр}} = P_j. \tag{6}$$

2. Затраты на операцию по j-му товару вычисляются по формуле

$$S_{отj} = \left(S_ф \Big/ \sum_{j=1}^{m} \left(P_{j\text{пр}} \mathrm{N}_j \right) \right) P_{j\text{пр}}, \tag{7}$$

Распределение затрат между элементами грузопотока для сборных грузов, например, тарно-штучных при транспортировке водным транспортом — контейнером на условиях LCL (*Less Than Container Load*), осуществляется пропорционально объемным показателям. (Методика распределения затрат по объемным характеристикам груза не приводится в тексте ввиду ее прозрачности).

Соответствие типа логистической операции, методики разнесения затрат и коэффициентов, используемых для вычисления объемного веса, установлено в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие методик для разнесения затрат по логистическим операциям

Идентификатор метода разнесения затрат	Применяемая методика разнесения затрат	Логистическая операция	Коэффициент исчисления объемного веса *K**
1	По весообъемным характеристикам	Авиатранспортировка	166,5
2	По объемным характеристикам	Морская контейнерная транспортировка	—
3	По весообъемным характеристикам	Транспортировка автомобильным транспортом, операции складского хранения и грузообработки	333

** — коэффициент исчисления приведенного веса K зависит от принятого для вида логистической операции метода исчисления объемного веса.*

Примечание. В табл. 1 коэффициенты взяты для международных транспортных операций.

Формирование заказов поставщику и пооперационный учет логистических затрат должны обеспечиваться возможностями корпоративной информационной системы управленческого учета предприятия [16] либо в простейшем случае быть выполнены в виде электронных таблиц (*Excel*) по форме, приведенной в табл. 2 и 3 (в примере указаны лишь поля и информация, необходимые для данных расчетов).

В качестве примера рассмотрим вариант доставки заказов от поставщиков из США, Тайваня, Германии с консолидацией в г. Санкт-Петербурге (рис. 3) и последующей транспортировкой грузовой партии из трех заказов в г. Киров. Банковский кредитный процент принят в размере 0,05 % в сутки.

Таблица 2

Логистические операции и затраты на их выполнение (фрагмент базы данных логистических операций)

Номер заказа (заказов)	Дата начала операции	Дата окончания операции	Метод разнесения затрат	Операция	Затраты, долл.
1	16.04	21.04	1	Авиатранспортировка Тайпей – СПб.	1000
1	21.04	25.04	3	Складирование в СПб.	91
2	04.04	22.04	2	Морская транспортировка Нью-Йорк – СПб. (20-ft container)	2000
2	23.04	24.04	3	Доставка порт – склад в СПб.	150
2	23.04	25.04	3	Складирование в СПб.	389
3	18.04	23.04	3	Автоперевозка Берлин – СПб.	2100
3	23.04	25.04	3	Складирование в СПб.	385
1, 2, 3	25.04	27.04	3	Автоперевозка СПб. – Киров	700



Рис. 3. Схема материалодвижения и консолидации заказов

Для получения результатов, приведенных в табл. 3, которая была подготовлена в Excel и обработана программой разнесения затрат, суммарные издержки на доставку заказа и единицы товара вычисляются как сумма затрат по операциям с заказом. В столбце «Стоимость ресурсов» отражена доля издержек от стоимости оборотных средств за время «товар в пути», приходящаяся на единицу товара (заказ), вычисляемая по формуле

$$S_{\text{от}j} = S_j T_{\text{ТП}} Q, \tag{8}$$

где S_j — цена единицы j-го товара (цена заказа), USD; $T_{\text{ТП}}$ — время «товар в пути»; Q — среднесуточный банковский кредитный процент либо его среднерыночная ставка (стоимость оборотных средств), предоставляемая финансовым отделом.

Формат табл. 3 выбран из соображений наглядности представления фактических приращений затрат на приобретение единицы товара (заказа) по мере выполнения логистических операций.

Таблица 3

Разнесение затрат по товарным позициям по логистическим операциям доставки (цены и затраты приведены в долл.)

Номер заказа	Наименование, модель	Количество	Цена за ед.	Вес, ед.	Объем, ед.	Транспортировка Тайпей – СПб.	Транспортировка Нью-Йорк – СПб.	Автоперевозка Берлин-СПб.	Доставка порт-склад в СПб.	Складирование в СПб.	Автоперевозка СПб. – Киров	Стоимость ресурсов	Суммарные издержки	Затраты на доставку в % от цены «склад продавца»
1	Концентратор EH-1601	150	52	1,37	0,006	3,86				0,36	0,07	0,29	4,58	8,81
1	Концентратор EH-500	100	22	0,73	0,003	2,06				0,18	0,04	0,12	2,40	10,89
1	Сетевая плата ENW-3502-2T	306	24	0,25	0,001	0,70				0,06	0,01	0,13	0,91	3,75
Всего по заказу 1			**17421**	**355**	**1,51**	**1000**				**91**	**18,63**	**95,81**	**1205,44**	**6,92**
2	Монитор Viewsonic CDE5500	160	350	17,00	0,15		11,90		0,83	2,15	1,72	4,03	20,63	5,89
2	Источник бесп. питания	300	40	3,50	0,004		0,32		0,06	0,15	0,12	0,46	1,11	2,77
Всего по заказу 2			**68000**	**3770**	**25,20**		**2000**		**150**	**389**	**311,68**	**782,00**	**3632,68**	**5,34**
3	Корпус AT 200W без БП	150	35	8,00	0,07			4,92		0,90	0,87	0,16	6,84	19,55
3	Корпус AT 200W с БП	100	40	10,00	0,07			4,92		0,90	0,87	0,18	6,87	17,16
3	Корпус ATX 230W с БП	120	50	12,00	0,1			7., 3		1,29	1,24	0,23	9,78	19,55
3	Материнская плата	130	80	0,70	0,003			0,21		0,04	0,04	0,36	0,65	0,82
Всего по заказу 3			**25650**	**3731**	**29,89**			**2100**		**386**	**369,69**	**115,43**	**2971,10**	**11,58**

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

Выводы

Таким образом, предложенный подход к распределению логистических затрат позволяет:

1. Осуществить расчет издержек на единицу продукции более точно, чем традиционными методами отнесения затрат по видам продуктов. Он необходим для определения доходности отдельных бизнес-направлений, себестоимости продукции и, как следствие, определения цен реализации готовых изделий.

2. Совершенствовать управление интегрированными цепями поставок диверсифицированной компании посредством анализа величин затрат на операционные логистические активности, определенных для каждой товарной позиции с целью оптимальной комплектации заказов и грузовых партий, выбора поставщиков и методов транспортировки.

3. Отнесение затрат возможно осуществить агрегированно: либо по заказам поставщику, что имеет смысл в случае однозначной принадлежности заказа к тому или иному продукту хозяйственной деятельности, либо сегрегированно с накоплением доли логистических затрат от общих затрат на логистическую операцию, увеличивающих стоимость приобретения каждой входящей в заказ товарной позиции. Далее, зная принадлежность товарной позиции к БН, имеется возможность либо выделить логистические затраты во входящей цепи, относящиеся к определенному БН за период, либо сформировать учетные цены материальных ресурсов в виде, более точном, чем при других методах разнесения логистических операционных затрат, что, в свою очередь, позволит увеличить точность исчисления стоимости материалов в себестоимости производимой продукции.

4. С позиций управления логистической системой пооперационный учет выполнения логистических операций в корпоративно-информационной системе дает возможность управлять логистическими циклами, поставщиками, контрагентами в цепи поставок, оптимизировать базу поставщиков, и кроме того, учет затрат на уровне товаров (артикулов) позволяет определить, насколько правильно сформированы многономенклатурные заказы, выполнен выбор транспорта и контрагентов в цепях поставок, а также проанализировать эффективность функционирования существующей логистической сети и логистической системы.

Список литературы

1. *Ковалев С. М.* Технология структуризации и описания организации — шаг за шагом / С. М. Ковалев, В. М. Ковалев // Консультант директора. — 2004. — № 8. — С. 24–36.

2. *Захарова А. В.* Методология Activity Based Costing (Функционально-стоимостной анализ) / А. В. Захаров // Вестник ИМСИТ. — 2009. — № 3–4. — С. 12.

3. *Толкачёва О. П.* Управление себестоимостью продукции в рыночной экономике с использованием метода Activity Based Costing (ABC) / О. П. Толкачёва, Д. В. Шубин // Современные аспекты экономики. — 2013. — № 12 (196). — С. 95–101.

4. *Кузьмина Е. А.* Функционально-стоимостной анализ и метод ABC / Е. А. Кузьмина, А. М. Кузьмин // Методы менеджмента качества. — 2002. — № 12. — С. 6–10.

5. *Ивлев В. А.* ABC/ABM/ABB-методы и системы. — 2-е изд. / В. А. Ивлев, Т. В. Попова. — М.: 1С-Паблишинг, 2007. — 208 с.

6. *Homburg C.* A note on optimal cost driver selection in ABC / C. Homburg // Management Accounting Research. — 2001. — Vol. 12. — Is. 2. — Pp. 197–205.

7. *Атаманов Д. Ю.* Распределение методов калькуляции себестоимости продукции — традиционного и операционно-ориентированного / Д. Ю. Атаманов // Маркетинг в России и за рубежом. — 2003. — № 3. — С. 3–17.

8. *Константинов В. А.* Алгоритм реализации метода activity based costing (abc) на российских предприятиях / В. А. Константинов // Управленческий учет. — 2013. — № 8. — С. 19–24.

9. *Innes J.* Activity-based costing in the UK's largest companies: a comparison of 1994 and 1999 survey results / J. Innes, F. Mitchell, D. Sinclair // Management Accounting Research. — 2000. — Vol. 11. — № 3. — Pp. 349–362.

10. *Schulze M.* Applying activity-based costing in a supply chain environment / M. Schulze, S. Seuring, C. Ewering // International Journal of Production Economics. — 2012. — Vol. 135. — № 2. — Pp. 716–725.

11. *Mansor N.* Information usefulness and usage in business decision-making: an activity-based costing (ABC) perspective / N. Mansor, M. Tayles, R. Pike // International Journal of Management. — 2012. — Vol. 29. — № 1. — P. 19.

12. *Gupta M.* Impact of activity based costing on firm's performance: Global perspective / M. Gupta // International Journal of Research & Development in Technology and Management Sciences. — 2013. — Vol. 19. — № 25. — Pp. 1–13.

13. *Askarany D.* Supply Chain Management, Activity-Based Costing And Organisational Factors / D. Askarany, H. Yazdifar, S. Askary // International Journal of Production Economics. — 2010. — Vol. 127. — № 2. — Pp. 238–248.

14. *Альбрехт Н. А.* Функционально-стоимостной анализ: сущность и практика применения / Н. А. Альбрехт // Управление корпоративными финансами. — 2005. — Т. 4. — С. 32–36.

15. *Каверина О. Д.* Проблемные вопросы стратегического управленческого учета / О. Д. Каверина, В. В. Патров // Экономика и управление. — 2012. — № 5 (79). — С. 64–69.

16. *Фролов Е.* MES-системы: оперативный функционально-стоимостной анализ для нужд производственного предприятия / Е. Фролов // Генеральный директор. — 2008. — № 9. — С. 76–79.

УДК 656.61

А. Л. Степанов,
д-р техн. наук, проф.;

Е. В. Носкова,
канд. техн. наук

КАДРОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

STAFFING OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF MARITIME TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Рассмотрены вопросы интеграции российского высшего образования с европейской и американской системами, инициировавшие переход на двухуровневую систему высшего образования: бакалавр – магистр, и присоединение России к Болонскому процессу, а также основные изменения в подготовке кадров в высших учебных заведениях, связанные с Болонским процессом, которые начались в 2011 г. Отмечается, что задачи возрождения экономики страны, поставленные правительством, которые обсуждались на Петербургском международном экономическом форуме, требуют подготовки кадров новой формации в системе двухуровневого образования в каждой отрасли. В статье рассмотрены изменения требований к кадровому обеспечению портов России в современных условиях специализации транспортных узлов и соответствие этим требованиям системы высшего образования Российской Федерации. Отмечается, что принятая в 2012 г. «Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России» определяет необходимые требования, инвестиции и направления развития морских портов до 2030 г. Предполагаемый рост портовых мощностей потребует внедрения современных информационных технологий и комплексов, инновационных подходов к управлению, масштабного применения концепции транспортного узла и логистического оператора к морским портам. Отмечается, что для успешного функционирования планируемого развития необходимо компетентное кадровое обеспечение.

Integration of Russian higher education with the European and American systems has initiated the transition to system "Bachelor-master" and Russia's accession to the Bologna process. Basic changes in the training of universities associated with the Bologna process started in year 2011. The article discusses the changes in staffing requirements for ports of Russia in modern conditions specialization transportation hubs and compliance to these requirements of the higher education system of the Russian Federation. The objectives of economic recovery of the

country, set by the government, were discussed at of the SPIEF, and require new formation cadres in a two-tier education system in each industry. The development strategy of sea port infrastructure in Russia defined necessary management's requirements, investments and development trends of sea ports until 2030. A proposed increase in port capacities will require the implementation of modern information technologies and systems, innovative approaches to management, of large-scale application of the concept of a transport hub and logistics operator to seaports. For the successful functioning of the planned development requires competent staffing.

Ключевые слова: транспортный узел, кадровое обеспечение, Болонский процесс, логистика, высшее образование.

Key words: transport hub, staffing, Bologna Process, logistics, higher education.

ОСНОВНОЙ причиной перехода на двухуровневое образование в реформировании высшего образования России послужил экономический спад, вступивший в противоречие с задачей подъема экономики в текущий период. Так, бакалавриат заканчивают в среднем 75 % студентов, 25 % из них идут в магистратуру, при этом бакалавриат существенно потерял фундаментальность инженерного образования, а магистратура представляет собой симбиоз из различных направлений, ориентированных на подготовку аналитиков, менеджеров и т. п. Поскольку вектор развития экономики страны обусловливает срочную необходимость возрождения всех отраслей народного хозяйства, в России, наконец, осознали недопустимость зависимости от импорта и потребность в высокообразованных профессиональных кадрах. С этой целью Президент России В. В. Путин объявил необходимость инновационного обновления образовательных программ с участием работодателей, а перед высшей школой была поставлена задача обновления профессиональной образования в рамках двухуровневой подготовки в соответствии с Болонскими принципами [1].

Транспортная отрасль, так же как и любая другая, нуждается в дипломированных кадрах инженеров-эксплуатационников, соответствующих высокому уровню технологической культуры на конкурентном мировом уровне, гарантирующем возможность участия отраслевой продукции в мировой торговле, в кадрах исследователей и управленцев, обеспечивающих инновацию, модернизацию и высокий уровень производительности труда [2] – [5]. Эти задачи четко обозначены в директивных документах транспортной отрасли. Так, в 2012 г. была принята «Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года» (далее — «Стратегия развития»). Этот документ был разработан в 2011 г. (головной разработчик — ФГУП «Росморпорт», соразработчики: ФБУ ВПО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», ООО «Инфра Проекты», ООО «Морские транспортные проекты», Maritime and Transport Business Solutions (Netherlands), ОАО «Союзморниипроект», ЗАО «Центральный научно-исследовательский институт морского флота»). «Стратегия развития» к 2030 г. предполагает рост портовых мощностей до 1,6 млрд т. В этом документе сформулированы четыре основные задачи развития морских портов [6], [7]:

– увеличение портовых мощностей и обеспечение эффективного развития портовой инфраструктуры;

– обеспечение безопасного функционирования морской портовой инфраструктуры и морского транспорта;

– создание условий, повышающих конкурентоспособность отечественных морских портов;

– совершенствование государственного управления в сфере морского портового хозяйства.

Необходимо заметить, что увеличение пропускной способности транспортного узла и его идеология предъявляют новые требования к компетенциям, умениям и навыкам персонала. Следует отметить, что идеология транспортного узла с использованием первых достижений информационных технологий позволила скоординировать работу всех участников транспортной деятельности [8], [9]. В частности, использование таких логистических операций, как укрупнение грузопотоков и специализация портов (контейнерные, балкерные, наливные и т.д.), а также изме-

нение объёма грузопотоков и технологии их обработки, сервисных условий, требований относительно производителей, потребителей и транспортных средств привело к необходимости отказа от универсальных схем механизации. Потребовалось освоение новейших технико-технологических решений для обеспечения высокопроизводительной обработки грузов и транспортных средств на территории портов с разделением всех логистических функций на специализированные территории в порту (при наличии возможности) или за пределами границ портового города («сухой порт») [10], [11].

В течение последних десятилетий наблюдается высокая эффективность новой организации обработки грузопотоков. Припортовые транспортные терминалы явились естественной инфраструктурой портовых городов и крупных грузообразующих (потребляющих) центров [11] – [13]. При этом эволюция портов привела к одновременной эволюции транспортно-экспедиторской деятельности [8], [9]. Транспортно-экспедиторские компании стали быстро развиваться как логистические провайдеры с предоставлением комплексной транспортной услуги (доставка груза от производителя до получателя точно в срок в заказанном количестве и качестве). Столь высокий уровень развития транспортно-технологических систем требует соответствующей эксплуатационной подготовки бакалавров по программам, согласованным с работодателями.

Рассматривая перспективы развития портов в транспортно-логистических цепях поставок и соответствующее кадровое обеспечение, следует отметить, что интеграция российского высшего образования с системой подготовки кадров Западной Европы имеет свои исторические корни и традиции (рис. 1).

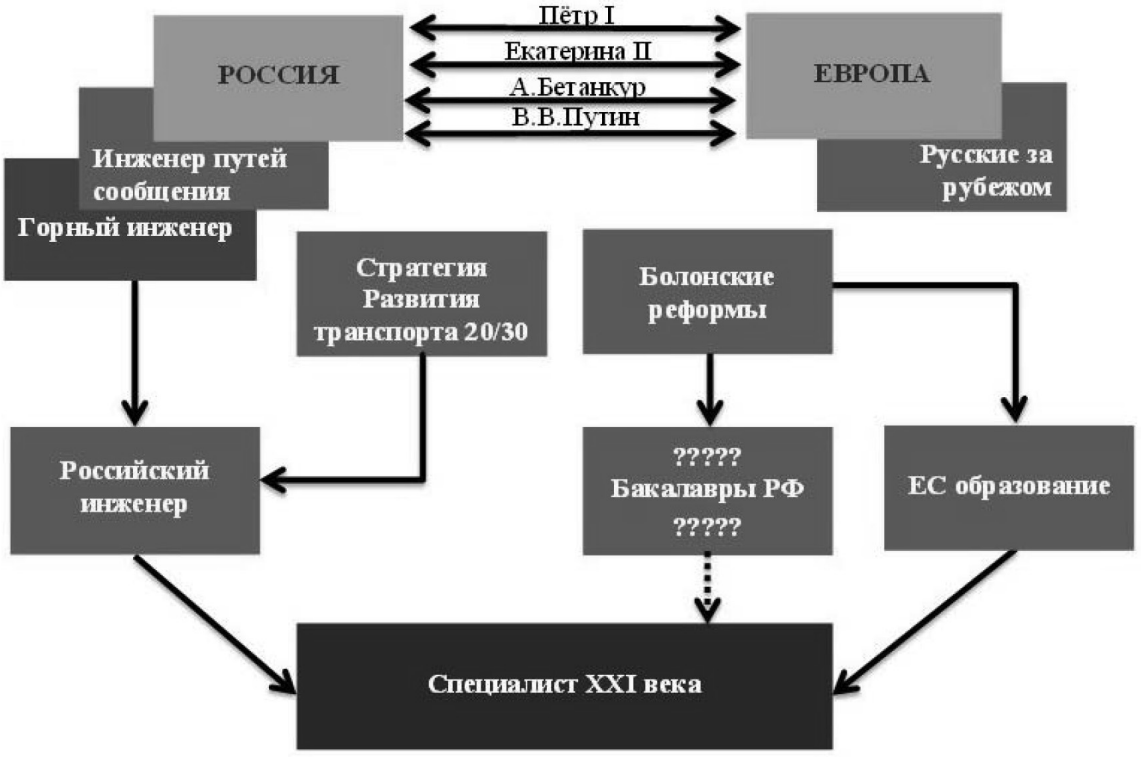


Рис. 1. Традиции взаимообогащения в образовании

Конкурентная способность современных портов определяется возможностью сервисных услуг в глобальных логистических цепях поставок в экономике. Срыв сроков обработки транспортных средств приводит к потерям в линейном судоходстве и мультимодальном транспортном взаимодействии по обеспечению материально-технического снабжения в строительстве и эксплуатации объектов экономики. Эти задачи определяют новые требования к компоновке портов и их эксплуатации во взаимодействии с транспортно-логистическими терминалами («сухими портами»)

и региональными терминалами, решающими задачи дистрибуции, консолидации и контейнеризации грузопотоков. Поэтому кадровое обеспечение этих технологий в условиях реформирования высшего образования является основной задачей.

Реформирование высшего образования привело к тому, что при подготовке кадров для транспорта, в том числе для портовой инфраструктуры, практически исчезли инженерная и отраслевая составляющие образования. Бакалавры до второго года обучения проходят фундаментальную подготовку, а затем, в зависимости от рабочего учебного плана вуза, может быть предложено два варианта дальнейшей образовательной траектории (рис. 2).

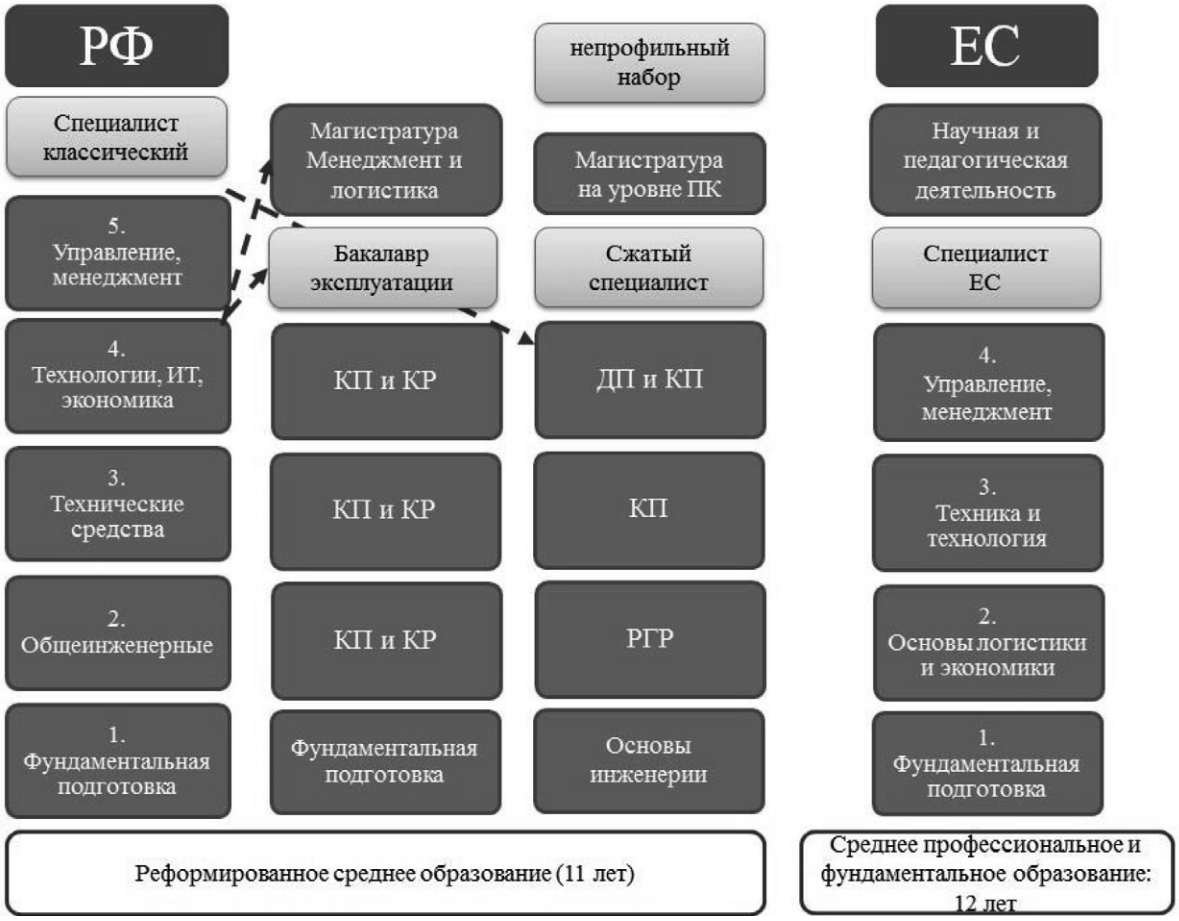


Рис. 2. Реформирование высшего образования

1-й вариант — пятилетний учебный план специалитета, предшествующий переходу на двухуровневое обучение *бакалавриат – магистратура* был сжат до четырехлетнего периода обучения в бакалавриате. В процесс обучения было включено выполнение расчётно-графических работ (РГР), курсового проектирования (КП) и дипломного проектирования (ДП). При этом в магистратуру проводится непрофильный набор без ограничений направления первой ступени высшего образования бакалавриата, т. е. предполагается поступление бакалавров по различным направлениям подготовки: филологов, юристов, бакалавров менеджмента и экономики, философов и т. п.). Таким образом, первый курс магистратуры становится адаптивным введением в специальность, дальнейшее обучение проводится на уровне профессиональных компетенций (ПК) — см. рис. 2.

2-й вариант — в рабочем учебном плане механически отсечены дисциплины пятого года обучения в специалитете и выведены на следующую ступень высшего образования — магистратуру в области менеджмента и логистики. При этом исключено дипломное проектирование, сокращены часы на изучение инженерных и технических дисциплин, выполнение курсового проектирования и проведение научно-исследовательской работы. На выходе первой ступени высшего

образования выпускник имеет лишь общие представления о специальности и операционной логистике. В этом случае отсутствует также интегральная парадигма в освоении специальности.

Необходимо отметить, что среднее образование в Евросоюзе продолжается в течение 12 лет, при этом последний год обучения направлен на профессиональную и фундаментальную подготовку к выбранной в 11-м классе профессии. Т. е. европейский бакалавр приобретает знания, умения и навыки в течение пяти лет — один год на ступени среднего образования и четыре года на ступени высшего образования. До 2011 г. в Российской Федерации европейскому образованию, по сути, соответствовал специалитет [14], [15]. В результате среднее управленческое звено остаётся без кадров, подготовленных системой высшего образования (рис. 3). Так как уровень подготовки бакалавров в современных условиях не соответствует установленным в настоящее время требованиям [16], то выпускники могут претендовать только на работу в службах специалистов среднего звена, подготовка которых соответствует среднему профессиональному образованию Российской Федерации (техникумы, колледжи).

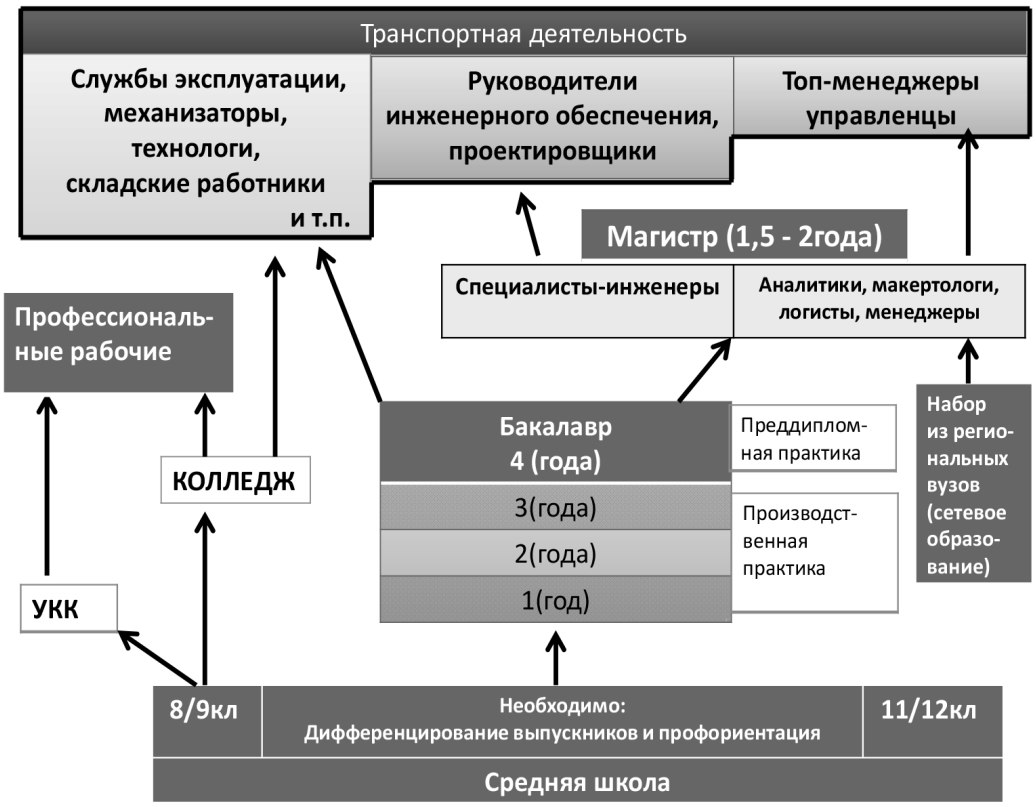


Рис. 3. Кадры для транспорта

Проведённый анализ изменений, произошедших после ликвидации специалитета в области подготовки кадров для транспортной деятельности, позволяет сделать следующие выводы.

1. Двухуровневая система высшего образования «бакалавр – магистр» не позволяет получить необходимые инженерно-экономические и управленческие компетенции для обеспечения кадровой потребности изменяющейся портовой инфраструктуры страны.

2. При обучении в магистратуре нет преемственности первой ступени высшего образования и дальнейшего повышения квалификационных требований, так как при приёме в магистратуру не устанавливается ограничений на направление первой ступени высшего образования – бакалавриат.

3. Обучение в бакалавриате не даёт выпускникам высшего образования преимуществ в полученных компетенциях по сравнению с программами углублённой подготовки среднего профессионального обучения.

4. Предложенная структура подготовки кадров (см. рис. 3) позволяет привести Болонскую структуру [14], [17] — форму образования, в соответствие с содержанием, необходимым для кадрового обеспечения экономики страны. Потребность в кадрах на этих уровнях деятельности различна и соответствует пропорции между бакалаврами и магистрами. Для достижения цели современного экономического развития РФ, в частности на транспорте, необходимо двухуровневую систему образования подчинить структуре потребности в кадрах. В высшей школе усилить эксплуатационно-технологическую подготовку в бакалавриате, оставив основы управления, магистратуру разделить на два профиля: инженерный и менеджерский, и, самое главное, восстановить профессиональную подготовку рабочих и техников с отраслевым образованием.

5. На примере транспортной отрасли предложена модель кадрового обеспечения для возрождения всех необходимых стране направлений хозяйствования.

Список литературы

1. «О мерах по реализации государственной политики в области образования и науки от 7 мая 2012, а также в стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года» (Распоряжение правительства РФ от 8 декабря 2011 года № 2227-р).

2. *Костылев И. И.* Транспорт и кадры / И. И. Костылев // Транспорт Российской Федерации. — 2007. — № 6 (13). — С. 58–60.

3. *Лёвин Б. А.* Подготовка кадров для транспортного комплекса России в условиях реформы высшей школы / Б. А. Лёвин // Транспорт Российской Федерации. — 2007. — № 2 (21). — С. 67–69.

4. *Панычев А. Ю.* Влияние международных транспортных проектов на подготовку специалистов для отрасли / А. Ю. Панычев // Транспорт Российской Федерации. — 2015. — № 2 (57). — С. 15–18.

5. Материалы Петербургского международного экономического форума 2015 г. — https://forumspb.com/ru/ (дата обращения 10.07.2015).

6. Мировой опыт развития морского транспорта / Государственный совет РФ. Морская коллегия при правительстве РФ. — М., 2007. — 98 с.

7. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года [Электронный ресурс]: — Загл. с титул. экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — http://portnews.ru/upload/basefiles/671_strategy_2030.pdf (дата обращения 25.06.2015).

8. *Жиленков В. С.* Морские терминалы в экономике России / В. С. Жиленков // Материалы МНПК «Европейский север: Инновационное освоение морских ресурсов (Образование – Наука – Производство)». — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. — 412 с.

9. *Жусупов С. Д.* Состояние и перспективы развития морских портов России / С. Д. Жусупов // «Транспорт Российской Федерации». — 2011. — № 6 (37). — С. 36–39.

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.

11. The relationship between seaports and the intermodal hinterland in light of global supply chains: European challenges // International Transport Forum. Discussion Paper. 2008. No 10. [Электронный ресурс]: — Загл. с титул. экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — // URL: http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/discussionpapers/DP200810.pdf (дата обращения 25.06.2015).

12. *Южилин В. А.* Состояние и перспективы развития морских портов в России / В. А. Южилин // Наука и транспорт. — 2007. — № 2 (21). — С. 8–10.

13. *Perez-Labajos C.* Competitive policies for commercial sea ports in the EU / C. Perez-Labajos, B. Blanco // Marine Policy. — 2004. — Vol. 28. — № 6. — Pp. 553–556.

14. Болонский процесс: итоги десятилетия / под науч. ред. В. И. Байденко. — М.: Нац. исследовательский технологический ун-т «МИСиС», Институт качества высшего образования, 2011. — 446 с.

15. *Костылев И. И.* Перспективы системы образования в отрасли водного транспорта / И. И. Костылев // Наука и транспорт. — 2011. — Спецвыпуск. — С. 72–73.

16. *Дыбская В. В.* Логист — профессия XX века: к системе подготовки и переподготовки специалистов по логистике и управлению цепями поставок / В. В. Дыбская, В. И. Сергеев // Логистика и управление цепями поставок. — 2013. — № 4 (57). — С. 7–26.

17. *Гребнев Л. С.* Болонский процесс и «четвёртое поколение» образовательных стандартов / Л. С. Гребнев // Высшее образование в России. — 2011. — № 11. — С. 29–41.

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

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 528.47

А. Б. Афонин,
канд. техн. наук, доц.;

С. А. Лутков,
канд. техн. наук;

А. Л. Тезиков,
д-р техн. наук, проф.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБАТ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА

FEATURES CREATION OF DEPTH CONTOURS IN THE CONDITIONS OF INSUFFICIENT HYDROGRAPHIC STUDY OF THE SEABED

Рассматриваются особенности отображения подводного рельефа на навигационных морских картах (НМК) в районах с недостаточной гидрографической изученностью. Проводится сравнение методов построения изобат на НМК с методами построения горизонталей на топографических картах на примере цифрового элемента рельефа, получившего наименование «седло». Обсуждается принцип выбора подробности съемки. Показано, что отсутствие признаков повышений дна при выполнении промерных работ не может служить гарантией отсутствия навигационных подводных опасностей в междугалсовом пространстве. Приводятся формулы для расчета численного значения опасной глубины при заданном междугалсовом расстоянии и фиксированной вероятности ее пропуска. Даются рекомендации мореплавателям по оценке достоверности отображения подводного рельефа на НМК. Подводный рельеф, отображённый на карте изобатами, не всегда достоверно отражает его реальный характер и при вынужденных отклонениях от рекомендованных путей следует критически оценивать положение изобат на карте, учитывая возможные пропуски минимальных глубин и соответствующих им изобат.

Discusses features of the display of the underwater terrain navigation maps (NMC) in areas with inadequate hydrographic studies. A comparison of the methods of constructing isobaths at NMC with methods for creating contours on topographic maps on the example of the digital element of relief, titled the «saddle». Discusses the principle of choosing the details of the shooting. It is shown that the absence of signs increases bottom when performing survey work cannot serve as a guarantee of the absence of underwater navigation hazards in midpalate space. Provides formulas for calculating the numerical values of the dangerous depths at a given midpalate distance and a fixed probability of its passes. Recommendations to mariners to assess the reliability of the display of the underwater terrain at NMC. The underwater relief displayed on the card by isobaths not always authentically displays its real character and at the compelled deviations from the recommended ways it is necessary to estimate critically the provision of isobaths on the card, considering possible admissions of the minimum depths and the isobaths corresponding to them.

Ключевые слова: изобаты, подводный рельеф, минимальные глубины, вероятность.
Key words: depth contours, seabed, minimum depths, probability.

ИЗОБРАЖЕНИЕ подводного рельефа является одним из важнейших элементов содержания навигационных морских карт (НМК). Точность, полнота и достоверность отображения подводного рельефа на НМК позволяют решать практические задачи судовождения, связанные с выбором безопасного пути движения судна и опознаванием места судна [1]. На НМК основой для отображения подводного рельефа служат глубины, полученные в ходе промерных работ. Для отображения подводного рельефа на НМК служат глубины, изобаты и условные знаки.

Изобаты представляют собой линии равных значений глубин и применяются на НМК для наглядного изображения подводного рельефа, дополнительного выделения навигационных опас-

ностей и характерных повышений, а также понижений морского дна: банок, мелей, баров, впадин, подводных долин и др. [2]. При построении изобат в основном используются такие же приемы, как и при построении горизонталей на топографических планах местности: интерполяция глубин, геоморфологическая интерполяция, метод сглаживания. Однако, в отличие от топографии, где картографируемая поверхность видна и особенности рельефа контролируются визуально, подводный рельеф, как правило, скрыт от непосредственного наблюдения, что, во многих случаях, влечет за собой неопределенность в его отображении на морских навигационных картах. При этом наиболее сложными являются случаи, когда опасные в навигационном отношении поднятия дна не были обнаружены при выполнении гидрографической съемки.

Аварии судов, связанные с недостаточной гидрографической изученностью, составляют в мировой статистике не менее 15 % всех аварий и занимают лидирующее место [2]. Одним из районов с недостаточной гидрографической изученностью является акватория Северного морского пути [3]. Перечень аварийных происшествий в арктических морях, приведенный в работе [4], свидетельствует о том, что минимальные глубины, существование которых могло быть предсказано вероятностными методами, становятся реальными навигационными опасностями. Так, в навигацию 1971 г. а/л «Ленин», следуя проходом Крайний в 2,3 мили к северу от о. Североморцев в Карском море при окружающих глубинах 20 – 30 м, коснулся грунта. В навигацию 1974 г. л/к «Киев» в районе с глубинами 22 – 40 м, расположенными к северо-западу от о. Греэм-Белл (Земля Франца Иосифа в Баренцевом море), коснулся грунта, получив пробоину. В навигацию 1986 г. т/х «Кандалакша» коснулся грунта на входе в пролив Свободной Кубы между о. Самуила и материковым берегом (море Лаптевых). В навигацию 1996 г. а/л «Ямал» сел на неизвестную банку в районе между о. Хейса и о. Большой Комсомольский в Баренцевом море за изобатой 20 м. Во всех указанных случаях причиной происшествий служили банки с глубинами над ними менее 8 м. Аварии произошли вне рекомендованных путей, в районах, где ранее была проведена съемка подводного рельефа. В ходе промерных работ признаки опасных поднятий дна обнаружены не были.

Следует отметить, что для уменьшения числа аварий морских судов, связанных с недостаточной гидрографической изученностью подводного рельефа, судоводители и гидрографы в своей практической деятельности должны учитывать неопределенность отображения подводного рельефа на морских навигационных картах, не считая, что морская навигационная карта гарантирует отображение всех подводных навигационных опасностей. Одним из типичных случаев неопределенности является элемент подводного рельефа, известный под названием *седло*, приведенный на рис. 1. На рис. 1, *а* этот элемент показан в виде отметок четырех глубин: 19, 21, 19 и 21 м, из которых две диагональные глубины меньше 20 м, тогда как две другие — больше 20 м. При построении 20-метровой изобаты возможен один из двух вариантов: выделение центральной области с глубинами, превышающими 20 м (рис. 1, *б*), либо выделение центральной области с глубинами, меньшими 20 м (рис. 1, *в*).

На топографических картах выбор варианта осуществляется по данным непосредственного визуального наблюдения высоты в центральной внутренней области выделенного элемента. Если в центральной области наблюдается «гряда», то рисовка горизонталей выполняется по варианту, приведенному на рис. 1, *б*, если в центральной области наблюдается «впадина», то рисовка горизонталей выполняется по варианту, приведенному на рис. 1, *в*.

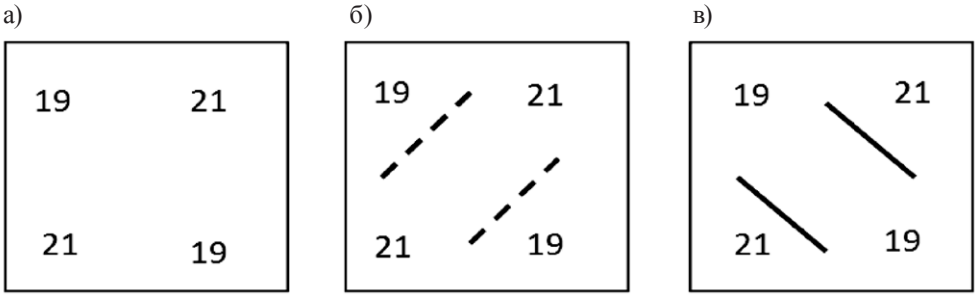


Рис. 1. Элемент подводного рельефа *седло*

При отсутствии визуальной или какой-либо другой информации, как это имеет место в гидрографии, оба варианта построения 20-метровой изобаты равнозначны. Тем не менее, с точки зрения принципа обеспечения безопасности мореплавания вариант, приведенный на рис. 1, *в*, является более предпочтительным, так как в центральной области он обеспечивает выделение мелководной зоны, в которой могут находиться опасные для мореплавания глубины.

Гидрографические работы относятся к дорогостоящим и трудоемким видам морской деятельности, поэтому при их планировании и проведении приходится преодолевать противоречие между необходимостью увеличения подробности съемки и желанием обследования максимальной по площади акватории. Согласно принципу, принятому в гидрографии, расстояния между промерными галсами в каждом районе систематического промера назначаются с таким расчетом, чтобы обнаружить признаки всех повышений дна, представляющих навигационную опасность [5]. Признаком подводных опасностей может служить любое повышение дна, зарегистрированное хотя бы на одном промерном галсе. При обнаружении такого повышения галсы должны сгущаться до полного выявления наметившейся мели, банки и т. п. Этот принцип, в полной мере, применяется на рекомендованных и оборудованных фарватерах, где на глубинах до 40 м рекомендуется проводить площадное обследование дна, гарантирующее обнаружение даже малых подводных опасностей с высокой вероятностью [6]. В других районах, где площадное обследование, как правило, не проводится, обнаружение всех подводных опасностей не может быть гарантировано.

На шельфе в диапазоне глубин 20 – 50 м рекомендованная подробность съемки для нерасчлененных равнин до настоящего времени принималась равной 750 – 1000 м [2]. Съемка с такой подробностью может гарантировать обнаружение подводных опасностей с горизонтальными размерами, превышающими 750 – 1000 м. Опасности с меньшими горизонтальными размерами могут попасть в пространство между промерными галсами и не быть обнаруженными. В случае, когда опасность попадает в пространство между промерными галсами, ее признаки ни на одном из галсов не регистрируются. Поэтому отсутствие признаков повышений дна на промерных галсах не может гарантировать отсутствие опасных глубин в междугалсовом пространстве. Очевидно, что если в междугалсовом пространстве имеются опасные глубины, то это будет отражаться на форме и составе изобат.

Таким образом, неопределенность в наличии навигационных опасностей приводит к неопределенности в построении изобат, которая увеличивается при уменьшении подробности промера или увеличении расстояния между отметками глубин. При построении изобат по данным, приведенным на рис. 1, предполагалось, что расстояние между отметками глубин настолько мало, что между ними допустима линейная интерполяция и никаких локальных, в том числе опасных повышений дна в центральной области, нет. Если же расстояние между отметками глубин велико, то между ними могут находиться локальные повышения дна с минимальной глубиной $Z_{\min}$. Наличие в центральной области подобной глубины определенным образом будет влиять на форму изобат.

Аналитическое решение задачи, связанной с оценкой возможного пропуска локального повышения дна в зависимости от подробности съемки было получено с использованием аппарата теории геометрической вероятности [7] в работах [8] – [10]. При этом необходимо выбрать модель локального повышения дна, которая описывает его форму, а также изменение горизонтальных и вертикальных размеров в зависимости от глубины. В работе [8] в качестве такой модели было предложено использовать сферический сегмент, диаметр D которого связан с его высотой h эмпирическим соотношением

$$D = 8{,}7h. \tag{1}$$

Параметр h может быть представлен как разность между глубиной Z_i, соответствующей основанию локального повышения дна, и минимальной глубиной $Z_{\min}$ над ним. Формула (1) может быть представлена также в виде

$$D = 8{,}7(Z_i - Z_{\min}). \tag{2}$$

При обследовании дна системой параллельных галсов с междугалсовым расстоянием L пропуск минимальной глубины $Z_{\min}$ соответствует условию, при котором ни один из промерных галсов не пересекает окружность диаметра D. В противном случае, когда окружность пересекается хотя бы с одним из галсов, признаки локального повышения устанавливаются экспериментально, что служит основанием для сгущения промера. Таким образом, вероятность пропуска глубины $Z_{\min}$ в междугалсовом пространстве может быть рассчитана по формуле

$$P_{\text{пр}} = 1 - \frac{8,7(Z_i - Z_{\min})}{L}, \tag{3}$$

которая может быть использована для вычисления минимальной глубины $Z_{\min}$, соответствующей заданной подробности L и фиксированному порогу вероятности $P_{Z\min}$:

$$Z_{\min} = Z_i - \frac{L\left(1 - P_{Z\min}\right)}{8,7}. \tag{4}$$

В случае, когда при выполнении промера с подробностью L ни на одном из галсов не зафиксированы признаки повышений дна, в междугалсовом пространстве может быть пропущена вычисленная по формуле (4) минимальная глубина $Z_{\min}$, принадлежащая локальному повышению дна, вероятность пропуска которого составляет $P_{Z\min}$. Примем в качестве порогового значения вероятность пропуска $P_{Z\min} = 0,5$. Тогда выражение (4) примет вид

$$Z_{\min} = Z_i - 0,057L. \tag{5}$$

Рассмотрим, как изменится форма 20-метровой изобаты на фрагменте, приведенном на рис. 1, *в*. По формуле (5) рассчитаем значения пропущенных с вероятностью 0,5 минимальных глубин, соответствующих трем междугалсовым расстояниям (100, 200 и 300 м):

$Z_{\min} = 13,3$ м (при $L = 100$ м);

$Z_{\min} = 7,6$ м (при $L = 200$ м);

$Z_{\min} = 1,9$ м (при $L = 300$ м).

Полученные значения $Z_{\min}$ нанесем в центр соответствующего фрагмента цифрового поля, приведенного на рис. 2. Для каждого полученного фрагмента построим изобаты.

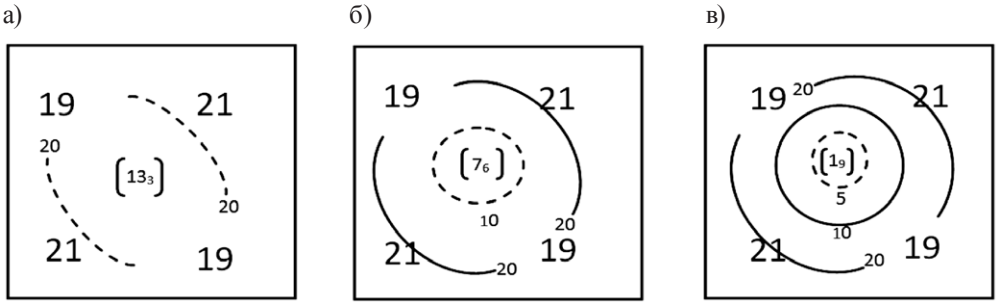


Рис. 2. Минимальные значения пропущенных с вероятностью 0,5 глубин в зависимости от междугалсового расстояния

На рис. 2, *а*, соответствующем $L = 100$ м, значение ожидаемой пропущенной глубины составляет 13,3 м. Изобата 20 м представлена двумя отрезками кривых линий, которые увеличивают область малых глубин по сравнению с областью, изображенной на рис. 1, *в*. На рис. 2, *б*, соответствующем $L = 200$ м, значение ожидаемой пропущенной глубины составляет 7,6 м. Область, ограниченная 20-метровой изобатой, расширена по сравнению с областью, изображенной на рис. 2, *а*. Кроме того, в центральной части появилась 10-метровая изобата. На рис. 2, *в*, соответствующем $L = 300$ м, значение ожидаемой пропущенной глубины составляет 1,9 м. Области глубин, ограниченные 20- и 10-метровыми изобатами, расширены по сравнению с областями, приведенными на рис. 2, *б*.

Кроме того, в центральной части появилась пятиметровая изобата. Следует отметить, что на морские навигационные карты наносятся только те глубины, которые были непосредственно измерены. Приведенные на рис. 2 минимальные глубины к измеренным не относятся, поэтому на морские навигационные карты они наноситься не могут. Существование минимальных глубин носит вероятностный характер. При решении задач, связанных с обеспечением безопасности мореплавания в районах с недостаточной гидрографической изученностью, следует учитывать вероятность наличия таких глубин в районе плавания.

В районах с недостаточной гидрографической изученностью судоходство организуется по рекомендованным путям, которые обследуются с максимальной подробностью. Вместе с тем, особенности навигации часто вынуждают судно отклоняться от хорошо обследованных рекомендованных курсов и попадать в акватории с недостаточной гидрографической изученностью. Такие отклонения происходят при плавании во льдах, при проведении буксировочных операций, при неблагоприятных гидрометеорологических условиях, при выполнении научных морских работ и т. д.

Таким образом, точность и полнота отображения подводного рельефа на морских навигационных картах зависит от подробности гидрографической съемки, глубины района и вероятности пропуска глубины, значение которой представляет опасность для данного судна. При недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа достоверность отображения подводного рельефа снижается, а вероятность пропуска опасных глубин растет.

Выводы

1. В работе предложен метод, позволяющий дать количественную оценку степени неопределенности отображения подводного рельефа на морских навигационных картах.

2. При высокой степени неопределенности отображения подводного рельефа рекомендуется принять все необходимые меры для снижения риска посадки судна на мель, не обозначенную на карте. К таким мерам следует отнести снижение скорости, непрерывный контроль глубины, возвращение на рекомендованный путь.

Список литературы

1. Правила гидрографической службы № 5. Составление и издание морских карт. — Ч. 1. — СПб.: УНиО МО РФ, 2009. — 306 с.

2. Проблемы Северного морского пути / под ред. А. Г. Гранберга и В. И. Пересыпкина. — М.: Наука, 2006. — 581 с.

3. *Решетняк С. В.* Северный морской путь. Численная оценка гидрографической обеспеченности трасс для судов с большой осадкой / С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков // Геодезия и картография. — 2008. — № 6. — С. 59–61.

4. *Решетняк С. В.* Формализованное представление условий, приводящих к авариям судов / С. В. Решетняк, С. Г. Амельченко // Геодезия и картография. — 2007. — № 12. — С. 38–42.

5. Правила гидрографической службы № 4. Съемка рельефа дна судоходных морских и речных акваторий. — СПб.: УНиО МО РФ, 2014. — 314 с.

6. Standards for Hydrographic Survey (5-th Edition). — Monaco: IHO. Special Publication. — 2008. — № 44. — 27 p.

7. *Амельченко С. Г.* Применение вероятностных методов в оценке свойств подводного рельефа / С. Г. Амельченко, А. Л. Тезиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 4 (50). — С. 30–31.

8. *Лутков С. А.* Оценка вероятности пропуска опасной глубины по данным навигационных карт арктических морей / С. А. Лутков, С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков // Навигация и гидрография. — 2013. — № 36. — С. 69–78.

9. *Решетняк С. В.* Ранжирование трасс Северного морского пути по критерию гидрографической обеспеченности / С. В. Решетняк, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3 (53). — С. 55–57.

10. *Решетняк С. В.* Оценка плотности распределения вероятности локальных поднятий дна в междугалсовом пространстве / С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 111–115.

УДК 574, 528.422

И. В. Кожухов,
канд. геогр. наук, проф.;

Е. Н. Колосков,
асп.;

Ю. Г. Фирсов,
канд. техн. наук, доц.

ЭЛЕКТРОННАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОГРАФИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ДАННЫХ ПО МОРФОЛОГИИ И ГЕОЭКОЛОГИИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

ELECTRONIC ENGINEERING HYDROGRAPHY AND THE PROSPECTS OF OBTAINING NEW RESULTS ON THE MORPHOLOGY AND BOTTOM ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THE ARCTIC SEAS

Рассмотрены вопросы использования гидрографических информационных технологий для исследования микрорельефа арктических морей. Современные средства съемки, реализованные в виде многолучевых эхолотов и батиметрических гидролокаторов бокового обзора, позволяют получать детальную информацию о топографии дна. Новые компьютерные средства визуализации цифровых моделей дна, полученных по результатам съемки, в виде 3D изображений дают настолько реалистичную картину рельефа, что речь может идти об изучении и исследовании подводных ландшафтов во всём их многообразии. Трехмерная визуализация дает возможность не только наблюдать морфологические особенности рельефа, но и получать информацию о его генезисе, что открывает новые перспективы изучения дна средствами гидроакустики в рамках различных направлений морской деятельности, включая морскую экологию. Приводятся изображения особых форм микрорельефа дна, часто встречающихся в арктических морях, связанные с различными нарушениями поверхности дна. Основное внимание уделено особенностям подводного рельефа в виде борозд, оставленных на грунте, вероятнее всего, стамухами, и положительным формам дна в виде куполообразных возвышений типа «гидролакколитов» или «булгуннях» — уникальных форм микрорельефа, как правило, приуроченных к донному газопроявлению в форме метановых выбросов.

The study examines modern hydrographic technologies for the Russian northern seas investigations. The modern hydrographic equipment is presented mainly as multibeam echosounders and bathymetric side scan sonars providing the possibility to obtain the detailed seabed topography. The hydrographic software tools used to process and analyze the bathymetry can create the seafloor digital terrain models with the high degree of resolution and provide 3D visualization. These new possibilities provide such realistic view of the sea bottom relief and environment that can be characterized as the marine landscapes.Thus it became possible to investigate the relief morphological peculiarities and obtain the information about the relief genesis. This opens the new opportunities for using the acoustic techniques for varies types of marine activity including the bottom environmental study. The arctic sea specific microrelief images are provided to show the abnormality of the bottom surface. The main attention is paid to specifics and bottom features such as trenches the grounded hummock traces and dome-shaped elevations of the Pingo-type — unique forms of microrelief usually confined to the botton getpreview in the form of methane emissions.

Ключевые слова: гидроакустика, многолучевые эхолоты, стамухи, газогидраты, гидролакколиты, трёхмерная графика, термокарст, эксплозия, метановые выбросы, клатраты.

Key words: hydrographic technologies, hydro acoustics methods, submarine gas-hydrates, seafloor gas venting, multi beam echo sounder, pingo, thermokarst, clathrate hydrate, 3D visualization.

ВЫСОКОШИРОТНЫЕ полярные зоны нашей планеты являются чрезвычайно важными природными системами. Степень их благополучия в экологическом отношении может заметно влиять на полушария в целом. Очередной этап освоения Арктики повлёк за собой целый ряд проблем климатического и экологического характера. Кроме того, отечественной наукой ещё в 1969 г. в разных местах океанического дна был обнаружен новый ресурс энергоносителей, так называемых *газогидратных месторождений* [1]. В настоящее время с появлением новейших гидроакустических комплексов стало возможным более эффективно решать возникшие перед наукой задачи, связанные с фактором экологического риска, а также с вопросами создания новой ресурсной базы [2]. Планета Земля представляет собой открытую термодинамическую систему, источниками энергии которой служат внутрипланетные процессы, в частности, — радиоактивное и глубинное тепло экзотермических реакций, во всём их многообразии. Тепловой поток литосферы не всегда выглядел одинаково. На протяжении истории Земли возникали и, возможно, ещё будут наблюдаться периоды активизации тепловой разгрузки, сопровождаемые *геологическими революциями* с присущим им усилением сейсмичности, вулканизмом и, как следствие, магматическими процессами [3].

Следует отметить, что земная кора как физическое тело может вести себя под действием возникающих нагрузок двояко. С одной стороны, в процессе влияния медленных статичных сил литосфера проявляет свойства пластичности, образуя в результате нарушения первичного залегания горных пород складчатые структуры, или *пликативные дислокации* (от лат. *plico* — складка и *dislocatio* — смещение). В отдельных случаях, когда цельность складчатых форм попутно нарушается секущими сквозь их толщу прорывами магмы, возникают дислокации несколько иного, *дизъюнктивного типа* (от лат. *disjunction* — разобщение) [4]. С другой стороны, в случае приложения импульсных нагрузок внешняя оболочка Земли, наоборот, реагирует как хрупкая субстанция, раскалываясь на отдельные блоки и образуя внутри себя сквозные трещины (разрывы) нередко гигантских размеров, измеряемых сотнями километров (рифты). Сквозь эти разрывы идёт мощный поток тепловой энергии в основном следствие радиоактивного распада U (урана), T_h (тория) и ^{n}K (изотопов калия) [5]. Указанные ранее процессы собраны в единую группу факторов, известную как *эндогенные*, или *внутриземные силы*, которые наряду с *экзогенными* (внешними) силами призваны формировать контуры земной поверхности, т. е. её рельеф. Если разнообразие форм на суше доступно для непосредственного (контактного) исследования, то элементы донной поверхности можно изучать главным образом неконтактными (дистанционными) методами. Таким образом, эффективность подводных исследований, в значительной мере, зависит от уровня существующей на данный момент технической оснащённости.

Существенный технологический прорыв в области гидроакустики, позволяет осуществлять визуализацию рельефа, т.е. получать изображение дна в объёмном виде [6] – [8]. Имеется в виду визуализация рельефа дна в формате трёхмерного изображения (3D). Данный метод применим, в частности, в отношении элементов микрорельефа. Всё зависит от масштабов конкретной съёмки. Речь идёт, в первую очередь, об использовании многолучевых эхолотов. Применение указанных средств явилось ведущей тенденцией в современной гидрографии. Как следует из публикаций [6], [8], мелководный вариант многолучевых эхолотов способен работать на частотах в диапазоне от 200 до 400 кГц, используя при этом линейно-частотную модуляцию, и обеспечивать управление сектором излучения. Количество батиметрической информации получается здесь настолько объёмным, что возникает необходимость применения батиметрических цифровых моделей релье-

фа, реализация которых возможна на основе регулярных сеток (гридов) и нерегулярных триангуляционных сеток. Одновременно электронная гидрографическая информационная система позволяет собирать и обрабатывать батиметрическую информацию в целях оперативной визуализации цифровой модели.

В гидрографической практике на протяжении длительного периода времени основное внимание в рамках отрасли было уделено задачам сугубо навигационного характера. Однако в связи с потребностями в изучении экологической и ресурсной составляющих Мирового океана изменения данной ситуации стали неизбежными. Нами предпринимаются попытки сосредоточиться именно на новом направлении в гидрографии, которое можно рассматривать как *береговую инженерию*, *инженерно-ресурсную экологию* или *подводное ландшафтоведение*. Так или иначе, но воспроизведение рельефа в объёмном виде значительно удобнее для человеческого восприятия. Оно позволяет даже неспециалистам легко фиксировать на уровне опознания образа *подвижные элементы* поверхности дна, ранее с трудом узнаваемые в двумерном (плоском) варианте. В результате значительно упрощается способ контроля этапов их формирования и перемещения с хронологической привязкой к конкретным штормовым циклам [7], [9]. Таким образом, открываются новые перспективы в исследовании динамики прибрежных участков морей, включая русловые процессы на реках.

Наряду с воздействием гидрогенного свойства, непосредственно связанным с динамикой водных масс (волн, течений, приливов) и не менее значимым следует считать фактор иного характера, а именно явление *активного термокарста*. В условиях северных широт указанный процесс способен оказывать заметное влияние на стабильность дна в определённых его точках. Внимание к данному явлению, например, может оказаться весьма актуальным в случае прокладки по дну подводных трубопроводов. При крупномасштабном промере трёхмерная модель позволяет легко выделять в пространстве статичные элементы рельефа (со знаком «плюс» или «минус») типа бугров пучения, западин, аласов, отслеживая при этом процессы их образования и развития. Дело в том, что при прокладке подводных коммуникаций в условиях криолитозоны значительно повышается уровень экологического риска. Движимый по трубопроводу нефтяной поток, к примеру, сопровождается нагревом корпуса трубы, что способно вызвать так называемый эффект «*тёплого крота*», т. е. протаивания подстилающей грунтовой массы. Результатом может стать нарушение целостности самой трубопроводной магистрали [10].

Графика цифровой модели способна обнаруживать на поверхности дна, в том числе многочисленные борозды своеобразной конфигурации (рис. 1 – 3). Можно предположить, что они генетически связаны с подвижками крупных глыб донного льда, стамух.

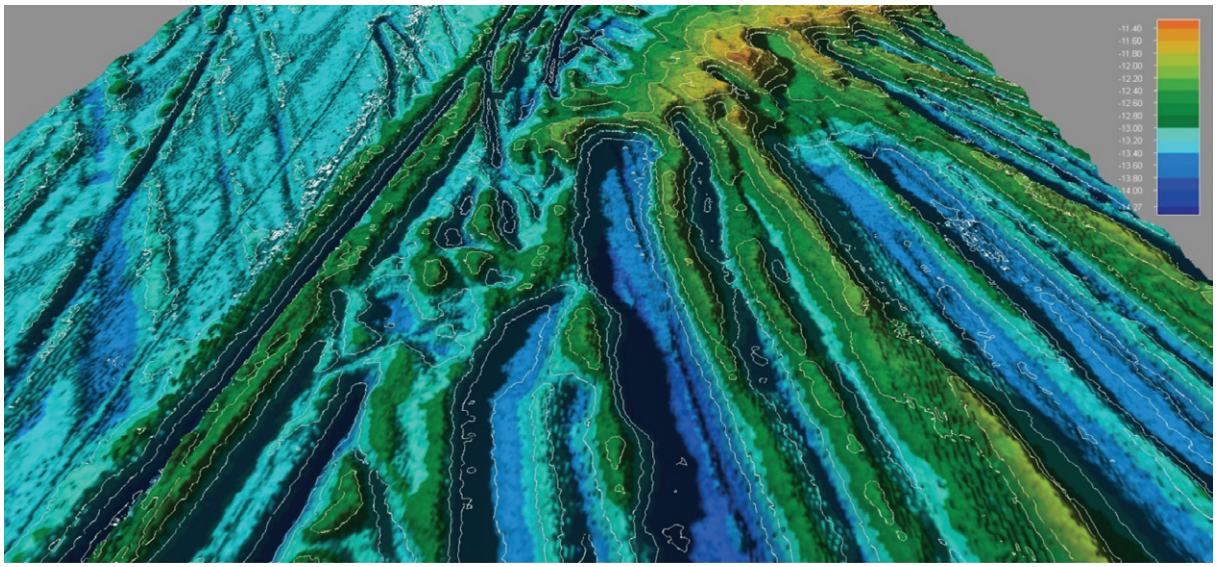


Рис. 1. Продольные и поперечные борозды на поверхности дна в условиях морского мелководья (район бара Обской губы, глубина 12 – 14 м)

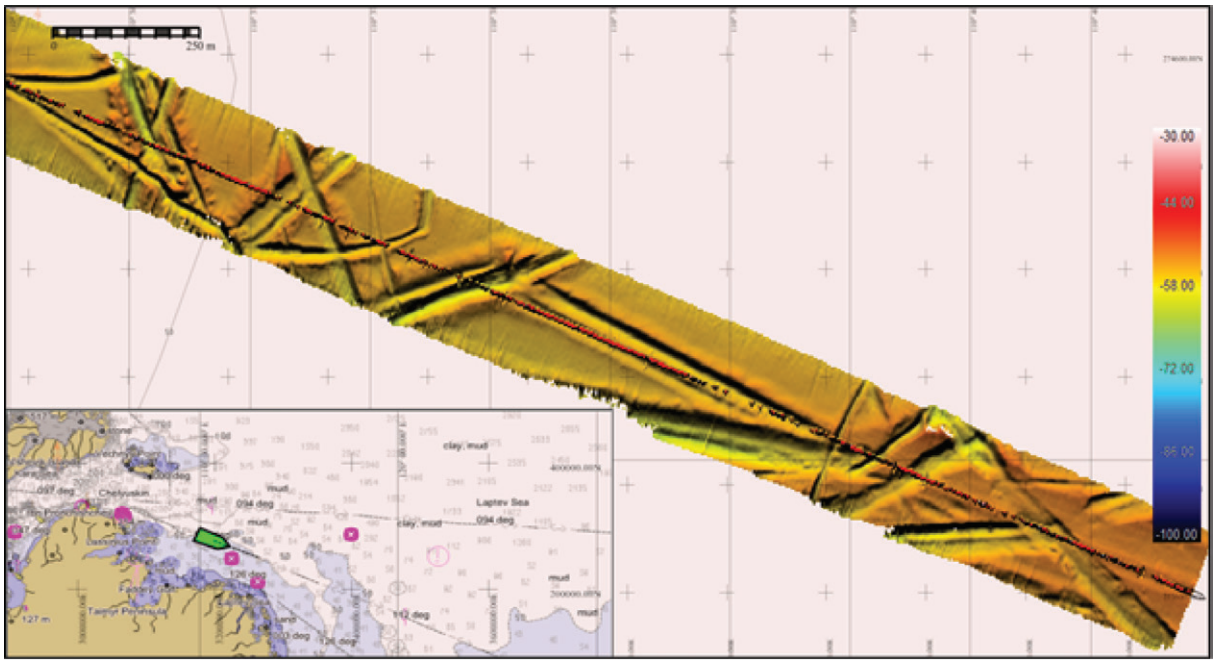


Рис. 2. Фрагмент плоского морского дна с характерными бороздами на его поверхности (район юго-западной части моря Лаптевых)

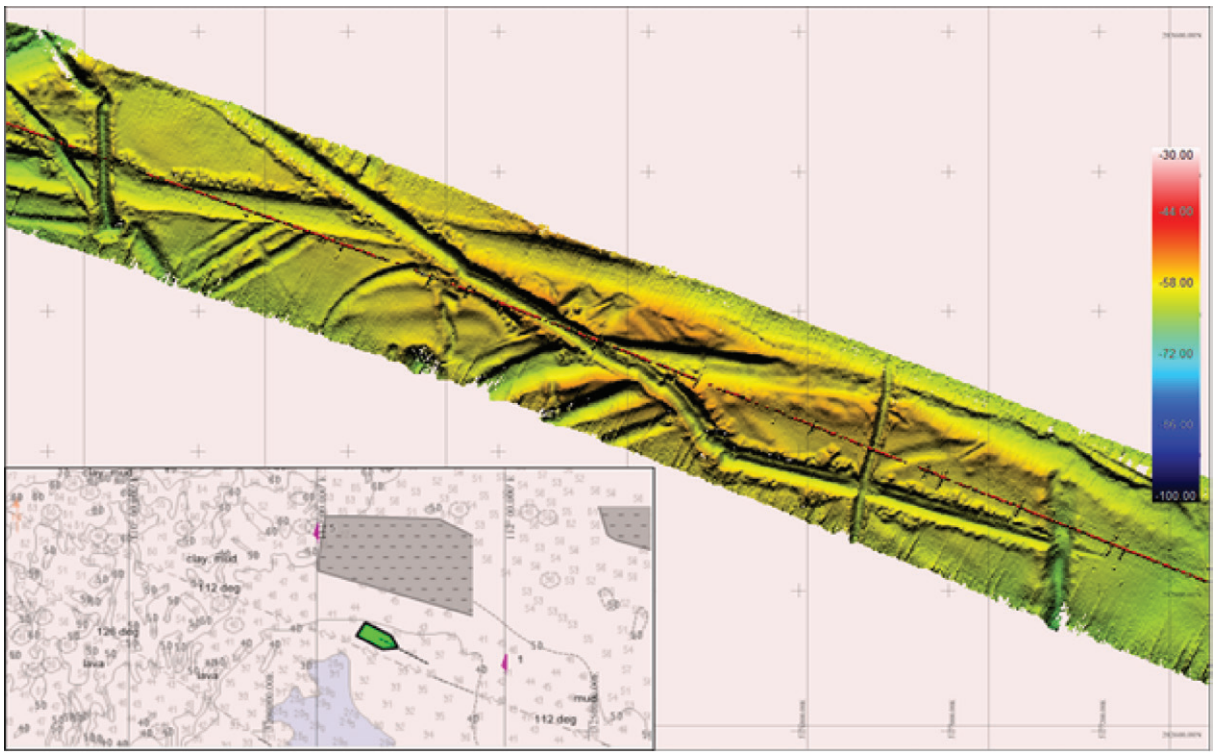


Рис. 3. Фрагмент плоского морского дна с характерными бороздами на его поверхности (район южной части моря Лаптевых)

Процессы смещения стамух в высокоширотных морских водоёмах мало изучены. Однако в связи с прокладкой тех же подводных коммуникаций (трубопроводы, кабельная связь и т. д.) данное направление может оказаться своевременным и чрезвычайно актуальным. Заметим, что ранее подобные процессы, вызванные подвижками стамух, было предложено называть *гляцио-корразией* (от лат. *glacies* — лёд и *corrado* — соскребать) [7]. Предложенный термин по своему

смыслу, однако, подходит, скорее, к случаям с коренными кристаллическим породами: *трогами*, *бараньими лбами* или *курчавыми скалами*. При наличии подстилающих грунтов сыпучего типа более приемлем известный в научном обиходе термин — «экзарация» (от лат. *exaratio* — выпахивание), когда при внешнем воздействии на ту или иную поверхность, состоящую из осадочных пород, образуются борозды или штрихи (см. рис. 2 и 3).

В итоге, для обозначения комплексного подхода в рамках развивающейся гидрографической ветви сам собой напрашивается обобщающий термин — «батиметрический мониторинг». Как выяснилось, возможности современной гидрографии не исчерпываются рассматриваемой тематикой. Последние материалы натурных наблюдений показали эффективность использования методов новейшей гидроакустики при исследовании иных проблем. В первую очередь, это обусловлено экологической (климатической) проблемой, а также фактором поиска дополнительных или альтернативных источников природных ресурсов.

В настоящее время широко известно, что климатическая ситуация на нашей планете в значительной степени зависит от концентрации в атмосфере свободного углекислого газа. Последнее означает, что в случае пополнения воздушной среды указанным химическим соединением усиливается *парниковый эффект.* История Земли такова, что на протяжении ряда геологических эпох существовал природный механизм *вывода* из атмосферы свободного CO_2 за счёт процессов карбонизации и фотосинтеза по следующим схемам:

$$CO_2 + H_2O + Ca^{2+} = CaCO_3 + 2H^+ \text{ (карбонизация);}$$

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow[\text{хлорофилд}]{h\nu} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \uparrow \text{ (фотосинтез).}$$

Именно углерод в связном состоянии стал главным элементом при формировании на планете Земля колоссальных запасов горючих ископаемых и одновременно послужил составной частью карбоната кальция ($CaCO_3$) в качестве основного материала при образовании коралловых рифов, атоллов, в том числе известковых островов. Процессы подобного рода принято называть *консервацией*, или переходом углерода в связную фазу (*биологические тупики*). Однако за последние десятилетия в атмосфере неожиданно стал прослеживаться процесс противоположного свойства, когда концентрации свободного CO_2 в воздухе вопреки существовавшей ранее природной схеме начали заметно возрастать. Большинство специалистов склонны видеть в этом техногенную причину. Сжигание человеком топлива и горючих материалов вносит ежегодно в атмосферу не менее $1 \cdot 10^{10}$ т углекислого газа (*биотехногенный эффект*). Подобная тенденция, как считают, не может не повлиять на характер климата планеты в сторону его потепления. Последствиям такого процесса даются неутешительные прогнозы. Неизбежным, к примеру, станет таяние полярных льдов, сопровождаемое катастрофическим подъёмом уровня Мирового океана, что должно превратить современные материки в архипелаги. Но особую опасность при глобальном таянии полярных льдов могут представлять разрушения *клатратов* — кристаллических каркасов во льду, полости которых заняты молекулами метана (CH_4), относящегося, наряду с CO_2, к категории тепличных газов. По мере предполагаемого таяния, высвобождающийся из ледовых полостей метан будет поступать в атмосферу в несоизмеримо больших количествах, чем от всех искусственных источников, вместе взятых. Возможные последствия подобного сценария трудно осмыслить в полном объёме и получить более или менее надёжный прогноз. Дело в том, что парниковая активность метана в 23 раза выше по сравнению с углекислым газом.

Совсем недавно наблюдениями из космоса было обнаружено в пределах суши (Ямало-Ненецкий автономный округ) несколько глубоких западин, внешне напоминающих кратерные ячейки. Нижняя часть этих «колодцев» оказалась заполненной водой, а непосредственно у надводных горизонтов в пробах воздуха было зафиксировано повышенное содержание метана. По мнению доктора геолого-минералогических наук А. Н. Портнова, происходит так называемая *метановая эксплозия*, связанная с планетарными изменениями климата, вызванная протаиванием и проседанием в тех или иных местах толщ вечной мерзлоты [11].

По материалам проводимых в мире геофизических съёмок в толщах морского дна помимо заполярной зоны, солидные запасы метана (CH_4) в связном состоянии обнаружены и на других широтах. В виде твёрдых гидратов (соединений метана с водой) они найдены в толще органических осадков во многих других зонах Мирового океана. Отдельный интерес, в частности, вызывают места стыковки материковой и океанической части земной коры. Известно, что указанные зоны являются областью высоких механических напряжений, за счёт которых, вероятно, осуществляется периодически наблюдаемое «выдавливание» наружу метана и его последующая эмиссия в окружающее водное пространство. Как следует из иностранных источников [12] и [14], запасы метана в форме газогидратов нередко обнаруживаются прямо на поверхности морского дна. Поднятые со дна моря куски газогидрата внешне напоминают «вывалянные в грязи» обломки льда. Собственно, это и есть лёд, но с высоким содержанием метана. По имеющимся оценкам, запасы указанного продукта в глубинах океана являются весьма значительными. Согласно некоторым данным, около 50 % всего имеющегося на Земле углерода сосредоточено именно в этих гидратах.

Однако на практике трудно представить себе возможность появления в недалёком будущем соответствующих технологий по добыче такого энергоносителя в промышленных масштабах. Для освобождения связанного ледовыми структурами метана предполагается, в частности, искусственный обогрев газогидратных монолитов. Такой подход представляется маловероятным, поскольку речь в данном случае идёт не о каких-либо локализованных в пространстве источниках, а об обширных газогидратных полях. Так, летом 2014 г. в процессе исследования юго-западной части акватории Карского моря (рис. 4) с использованием сонаров новейшего образца одним из авторов настоящей статьи в качестве особенностей подводного рельефа было зафиксировано куполообразное возвышение над ровной поверхностью дна. Сам по себе этот факт мог представлять лишь сугубо геоморфологический интерес. Однако расположение данного бугристого образования совпало с местом выброса (эксплозии) из земных недр облака газовых пузырей. Явление это было зафиксировано непосредственно в режиме реального времени в виде точечного газового факела.

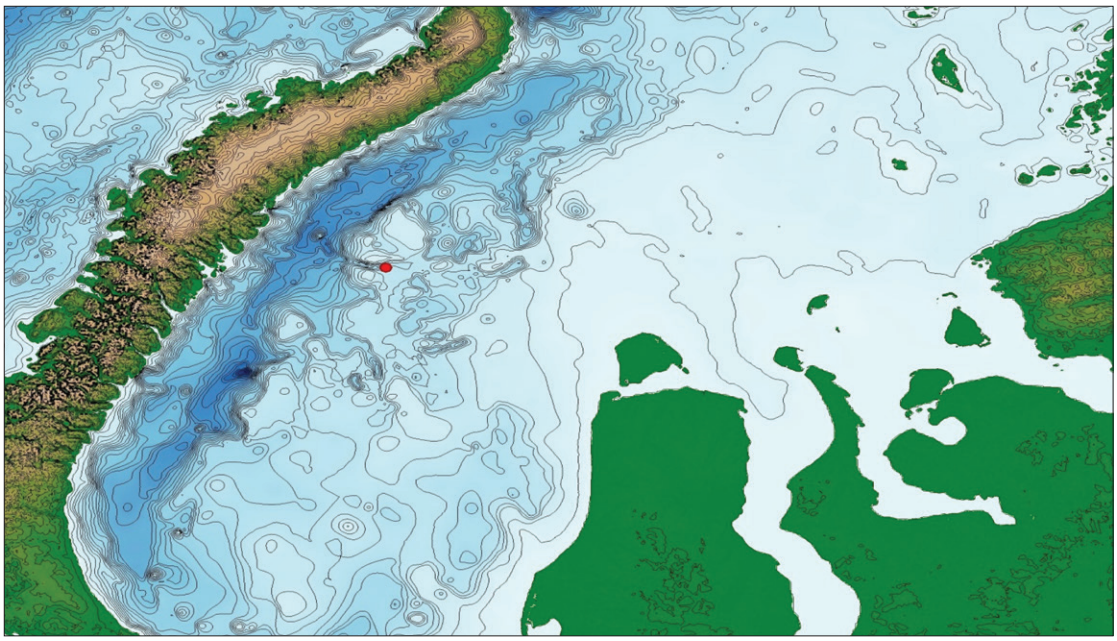


Рис. 4. Карта-схема юго-западной части Карского моря
(место обнаруженной эксплозии обозначено красным кружком)

В данном случае, скорее всего, речь идёт о метановом газопроявлении, которому в последнее время, как отмечалось ранее, уделяется столь серьёзное внимание в периодической научной зарубежной литературе [12] – [20]. Наивысшая точка обозначенного бугристого образования соответствовала глубине 40 м, а его относительная высота (превышение над окружающим плоским дном) составила 30 – 40 м (рис. 5).

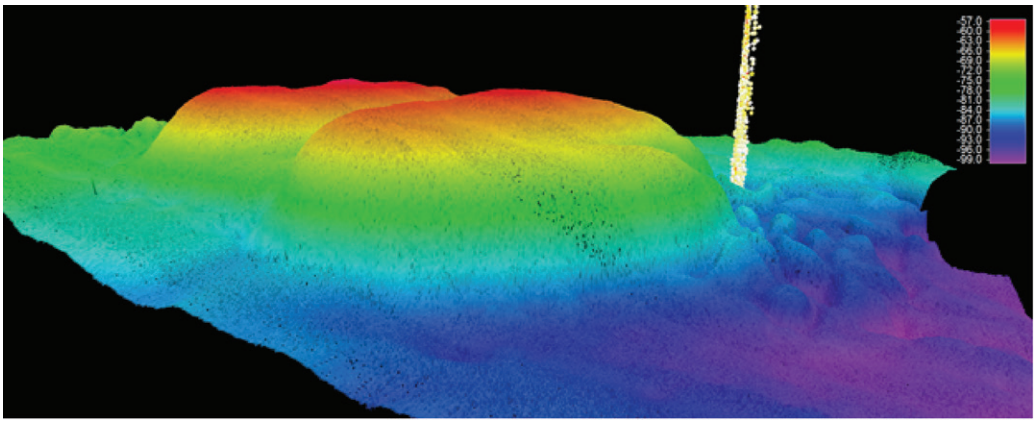


Рис. 5. Положительная форма подводного рельефа на дне юго-западной части Карского моря

По имеющимся в настоящее время материалам трудно определить, является ли процесс газового проявления следствием каких-либо морфологических подвижек или, наоборот, обозначенная на рисунке выпуклость возникла как результат эксплозивных процессов. Обнаруженная форма внешне напоминает повсеместно распространённые на суше в районах вечной мерзлоты бугры пучения. Высота таких бугров относительно окружающих равнин может достигать 30 – 40 м. Их диаметр в нижнем сечении измеряется сотнями метров, а, порой, и первыми километрами. Но в контексте разрабатываемой тематики речь идёт лишь о гидролакколитах. По сравнению с обычными формами пучения особенность этих форм заключается в непременном наличии в их основании ледовых глыб. В Якутии такие формы называют *булгунняхами*, а в Забайкалье — *коврижками*. Оба термина введены в научный обиход [21].

Вулканическая деятельность на Земле, с характерными для неё формами рельефа, относится к категории *эндогенных процессов*. Сюда же относят и особую разновидность вулканов, проявляющих лишь сольфатарную активность (выделение из недр горячих газов и воды). Скорее всего, данное образование, в силу его линейных и морфологических характеристик, генетически более подходит к категории гидролакколитов [22]. Что касается выявленной эксплозии, то на сегодняшний день нет оснований делать какие-либо окончательные выводы относительно её генезиса. Дело в том, что в основании рассматриваемого объекта был обнаружен в земной коре с помощью низкочастотной аппаратуры тектонический разлом, т. е. утверждать о сугубо экзогенном характере наблюдаемого эффекта преждевременно.

Безусловно, рассматриваемый феномен в исключительно научном плане может вызывать у специалистов тот или иной интерес, но в конкретной публикации главным служит не столько происхождение данного бугра, сколько факт пространственной привязки наблюдаемой точечной эксплозии к определённой форме рельефа. При более подробном изучении обнаруженной формы чётко просматривается ряд кольцевидных ячеек ближе к её основанию, напоминающих сквозные отверстия**.** Скорее всего, эти точечные углубления служат как раз каналами выхода газа. Последнее, собственно, и подтверждается непосредственным актом газопроявления над жерлом одной из ячеек на момент съёмки (рис. 6) — [8]. Если подтвердится закономерность пространственной привязки очагов дегазации к конкретным подводным формам рельефа, вопросы поиска и картирования участков альтернативных носителей энергии в пределах доступных глубин могут явиться весьма актуальным научным направлением с большой инженерной перспективой. Именно локализованный (струйчатый) вариант газопроявления, по сравнению с его площадными формами, представляется наиболее доступным в плане реализации конкретных проектов по добыче озвученного энергоносителя в промышленных масштабах. В связи с этим весьма оптимистично для гидрографии звучат выводы отечественных исследований, опровергающие тезис о повсеместности распространения газовых гидратов именно в площадном варианте. По материалам российских геологов, реальное распространение данного энергоносителя носит *селективный характер*, т.е. встречается в виде очаговых скоплений [1].

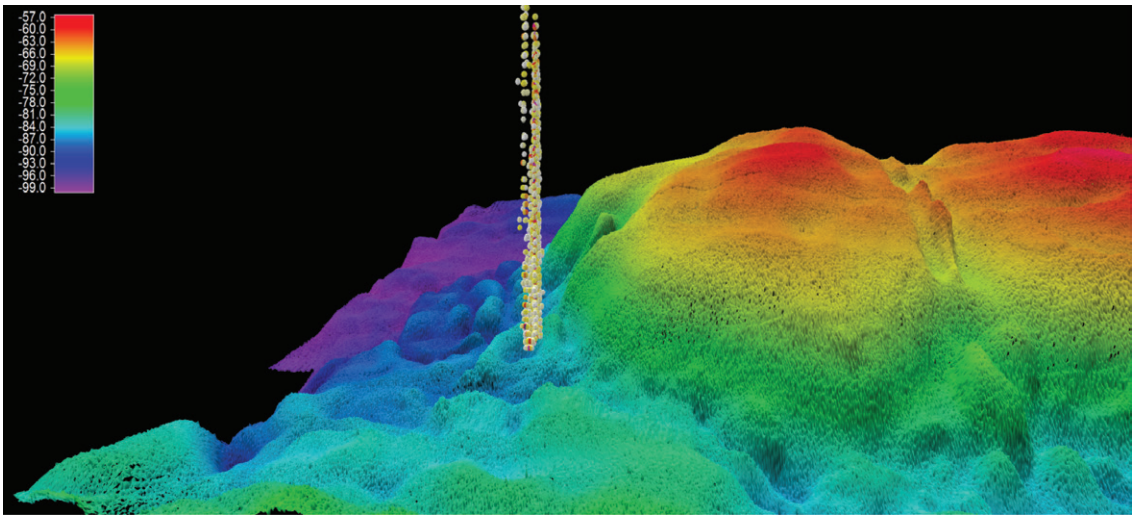


Рис. 6. Визуализация донного газопроявления в программе «Fledermause»

По нашему мнению, вероятнее всего, подобные локализованные очаги (часть из них) генетически должны быть приурочены к тем или иным формам подводного рельефа. Таким образом, следует предположить, что фактор газопроявления относится к категории процессов экзогенного свойства, и, скорее всего, никак не связан с глубинными процессами в земной коре, в том числе, с сульфатарным вулканизмом. В таком случае именно *морфологический подход* может оказаться решающим в методологии поиска промышленных залежей газогидрата. Как свидетельствуют иностранные источники, из одного кубического метра твёрдого гидрата можно выделить до 164 м^3 газообразного метана. Таким образом, укоренившееся понятие «болотный газ» ныне не укладывается в привычные семантические рамки данного словосочетания.

Выводы

1. Достижения технического прогресса в области геоматики обеспечили появления нового научного направления – *электронной инженерной гидрографии*.

2. На небольших глубинах (менее 100 м) применение современных гидроакустических средств в виде многолучевых эхолотов при выполнении площадной съемки с надводных судов обеспечивает возможность создание детальной цифровой модели рельефа.

3. Новые гидрографические информационные технологии трехмерной визуализации способны на основе детальных цифровых моделей рельефа обеспечить создание реалистичных изображений подводного микрорельефа в виде «синтезированных» подводных ландшафтов.

4. Применение новых гидроакустических и гидрографических информационных технологий ведет к новому этапу изучения морфоструктур и генезиса подводного рельефа. Это обеспечит как более высокий уровень безопасности мореплавания, так и качественно новый уровень научных знаний о рельефе. Практический аспект в геоморфологии заключается в научном обеспечении решения задач при проектировании и строительстве инженерных сооружений на шельфе.

5. Проблема изучения морфологии и генезиса подводного рельефа особенно актуальна для арктических шельфов, расположенных в зонах вечной мерзлоты и связанных с ними газогидратных месторождений.

6. Особое внимание следует обратить, во-первых, на факт появления нового поколения гидроакустической аппаратуры и специализированных информационных технологий пространственной визуализации цифровых моделей рельефа дна, позволяющих минимизировать экологические риски при освоении шельфовых морей, а, во-вторых, на открывшуюся перспективу целенаправленного оперативного поиска очагов концентрации газогидратных месторождений с помощью тех же акустических средств и информационных технологий.

Список литературы

1. *Гинсбург Г. Д.* Субмаринные газовые гидраты / Г. Д. Гинсбург, В. А. Соловьев. — СПб.: ВНИИ «Океангеология», 1994. — 199 с.

2. *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.

3. *Галеркин Л. И.* Тихий океан / Л. И. Галеркин, М. Б. Бараш, В. В. Сапожников [и др.]. — М.: Мысль, 1982. — 316 с.

4. *Каттерфельд Г. Н.* Лик Земли и его происхождение / Г. Н. Каттерфельд. — М.: Географгиз, 1962. — 152 с.

5. *Семененко Н. П.* Континентальная кора / Н. П. Семененко. — Киев: Наукова думка, 1975. — 197 с.

6. *Фирсов Ю. Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-история, 2010. — 348 с.

7. *Фирсов Ю. Г.* Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.

8. *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.

9. *Кожухов И. В.* Системный подход к изучению потоков наносов в мелководной зоне морей для обеспечения нормального режима судоходства / И. В. Кожухов // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3 (61). — С. 30–34.

10. *Русак О.* Безопасность жизнедеятельности / О. Русак, К. Малаян, Н. Занько. — СПб.: Изд-во «Лань», 2001. — 448 с.

11. *Портнов А. Н.* Опасные дыры Земли / А. Н. Портнов // Природа. — 2014. — № 11 (1191). — С. 94–96.

12. *Keith A.* Kvenvolden. Potential effects of gas hydrate on human welfare / A. Keith // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. — 1999. — Vol. 96. — P. 3420–3426.

13. *Naudts L.* Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea / L. Naudts, J. Greinert, Y. Artemov *[et al.]* // Marine Geology. — 2008. — Т. 251. — №. 3. — С. 253–267.

14. *Miriam Kastner.* Oceanic minerals: Their origin, nature of their environment, and significance: Proc. Natl. Acad. Sci. USA / Kastner Miriam. — 1999. — Vol. 96. — P. 3380–3387.

15. *Paull C.* Realizing the Energy Potential of Methane Hydrate for the United States [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12831 (дата обращения: 18.05.2015 г.).

16. *Paull C. K.* Seafloor geomorphic manifestations of gas venting and shallow subbottom gas hydrate occurrences / C. K. Paull, D. W. Caress, H. Thomas [et al.]. — Geosphere, 2015. — 11(2). — P. 491–513.

17. *Huggett R. J.* Fundamentals of Geomorphology / R. J. Huggett. — London: Routledge, 2007. — 2 Ed. — 458 p.

18. *Shakhova N.E.* The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle / N. E. Shakhova [et al.]. — Geophysical Research Letters. — 2005. — Vol. 32.

19. *Weber T. [et al.].* Acoustic estimates of methane gas flux from the seabed in a 6000 km 2 region in the Northern Gulf of Mexico / T. Weber, L. Mayer, K. Jerram [et al.] // Geochem. Geophys. Geosyst. — 2014. — Vol. 15. — P. 1911–1925.

20. *Westbrook G.* Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin // Geophysical Research Letters. — 2009. – Vol. 36. – L15608.

21. *Втюрина Е. А.* Булгуннях: гляциологический словарь / Е. А. Втюрина / Ред. В. М. Котляков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 57 с.

22. *Воскресенский К. С.* Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России / К. С. Воскресенский. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2001.

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

УДК 519.688

О. А. Тимофеева,
асп.

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

ANALYSIS OF NUMERICAL METHODS FOR CALCULATING FLUID FLOW IN THE CULVERTS

В данной работе проводится сравнительный анализ двух существенно различных моделей двумерного течения жидкости. Первая — это модель Лаврентьева, которая описывает отрывные течения идеальной жидкости с постоянной завихренностью. В ней предполагается, что зона вихревого течения отделена от основного потока некоторой нулевой линией тока. Нахождение линии раздела включает в себя последовательное решение уравнения Пуассона с корректируемой линией раздела областей. Расчет проводится с помощью комплекса программ, выполненного автором в системе Maple, базирующегося на методе граничных элементов. Вторая модель — модель течения идеальной жидкости, основанная на решении уравнений неразрывности, сохранения импульса и энергии. Расчет выполняется методом конечных элементов. Полученные результаты значений таких важных параметров, как давление и скорость жидкости, рассчитанные двумя методами, согласованы между собой.

In this study, we make a comparative analysis of the two fundamentally different models of two-dimensional fluid flow. The first — model of Lavrent'ev, describes separated flows of an ideal fluid with constant vorticity. It is assumed that the area of vortex flow is separated from the main flow by zero stream line. Finding the separation line include a consistent solution of Poisson's equation with the correctable line between regions. The calculation is performed by using a complex of programs, executed by the author in the Maple. Program based on the boundary element method. The second model — flow model of ideal fluid, based on the solution of the equations of continuity, energy and momentum conservation. The calculation is performed by finite element method. The obtained values of important parameters such as pressure, fluid velocity, calculated by two methods are agreed.

Ключевые слова: идеальная жидкость, вихревое течение, модель Лаврентьева.
Key words: ideal fluid, vortex flow, Lavrent'ev model.

Введение

В задачах математического моделирования течения потока по обходным галереям судоходного шлюза в процессе его наполнения и опорожнения существенное значение имеют простые и надежные модели, подтверждающие опытные данные и натурные измерения.

В работе предлагается две модели расчета, основанные на уравнении Гельмгольца. Основным уравнением течения жидкости в форме Гельмгольца в плоском стационарном случае является уравнение

$$V_x \frac{\partial \omega}{\partial x} + V_y \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \Delta \omega, \tag{1}$$

где ω – завихренность, удовлетворяющая уравнению

$$\omega = \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} = -\Delta \psi. \tag{2}$$

В модели Лаврентьева [1] предполагается, что зона отрыва отделена от основного течения некоторой нулевой линией тока [2] – [5]. Внутри зоны отрыва течение предполагается вихревым с постоянной завихренностью

$$\Delta \psi = \begin{cases} 0, & \psi > 0 \\ \omega, & \psi < 0 \end{cases}. \tag{3}$$

Несмотря на то, что условие постоянства завихренности является грубым приближением к движению вязкой жидкости, оно является точным для предельного стационарного течения вязкой жидкости, когда вязкость стремится к нулю [6], [7]. Поскольку линия отрыва неизвестна, то для ее нахождения применяется итерационный метод решения, такой, что в каждой итерации требуется решить отдельное уравнение Пуассона. Данная схема решения уравнения (3) позволяет в полной мере воспользоваться теорией граничных интегральных уравнений. С одной стороны, решение достаточно быстро сходится, его результатом является построение зоны отрыва течения, определение значений функции тока, при помощи которой находятся основные параметры: давление и скорость жидкости [8] – [10]. С другой стороны, расчет параметров течения невязкой жидкости на базе вариационного метода конечных элементов существенно более сложный. Тем не менее, выполненные расчеты оказались согласованными с расчетами на базе комплекса программ автора (свидетельства о регистрации в Реестре программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности № 2014616781 от 03 июля 2014 г. и № 2013613636 от 11 апреля 2013 г.) на основе модели Лаврентьева.

Основная часть

Расчетная область представляет собой прямоугольник, а плоский затвор — поперечный прямолинейный выступ, расположенный на верхней границе (рис. 1).

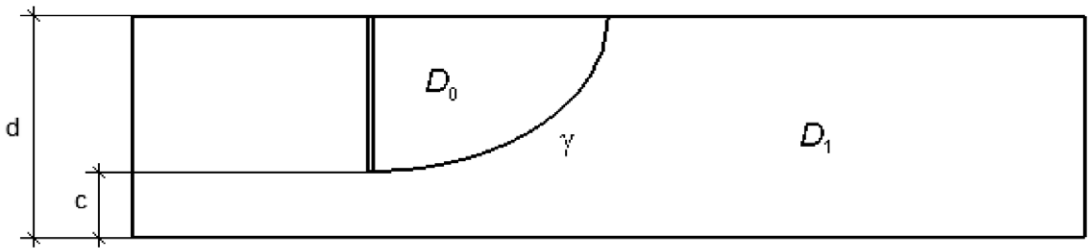


Рис. 1. Общий вид камеры с выступом и движения жидкости

Плоское течение жидкости в рассматриваемой области, согласно модели Лаврентьева, распадается на два независимых течения:

– *потенциальное течение* в области D_1, ограниченной стенками камеры, линиями входа и выхода потока и струей γ, срывающейся с нижнего края затвора;

– *вихревое течение* с постоянной завихренностью ω, ω > 0 в области D_0, дополняющей D_1 до всей области D.

Кривую γ надо подобрать так, чтобы она была линией тока и чтобы поле скоростей оставалось непрерывным всюду в области D. Для функции тока получим уравнение Пуассона с разрывной правой частью:

$$\Delta\psi = \begin{cases} 0, & \psi < Q \\ -\omega, & \psi > Q \end{cases}, \tag{4}$$

с заданными граничными условиями ψ_0:

– на нижней стенке галереи функция тока равна нулю;

– на верхней стенке и затворе функция тока равна расходу жидкости Q;

– на входе и выходе функция тока изменяется непрерывно;

– $\psi = Q$ на γ, так как кривая γ является линией тока.

Алгоритм нахождения линии раздела представлен в виде блок-схемы (рис. 2) и включает последовательное решение уравнения Пуассона с корректируемой линией раздела областей. На рис. 3 приведен интерфейс программы, на котором указаны параметры области: «*Высота галереи*», «*Длина участка галереи перед затвором*», «*Длина участка галереи за затвором*», «*Относительная высота поднятия затвора*», «*Ширина затвора*», «*Расход жидкости*»,

«*Исходная величина завихренности*», «*Максимальная погрешность вычислений*», «*Количество узлов на участке*», «*Корректировка величины завихренности*». В результате работы программы получаем картину линий уровня функции тока и графики скоростей течения перед затвором и за ним, а также график результирующего давления.

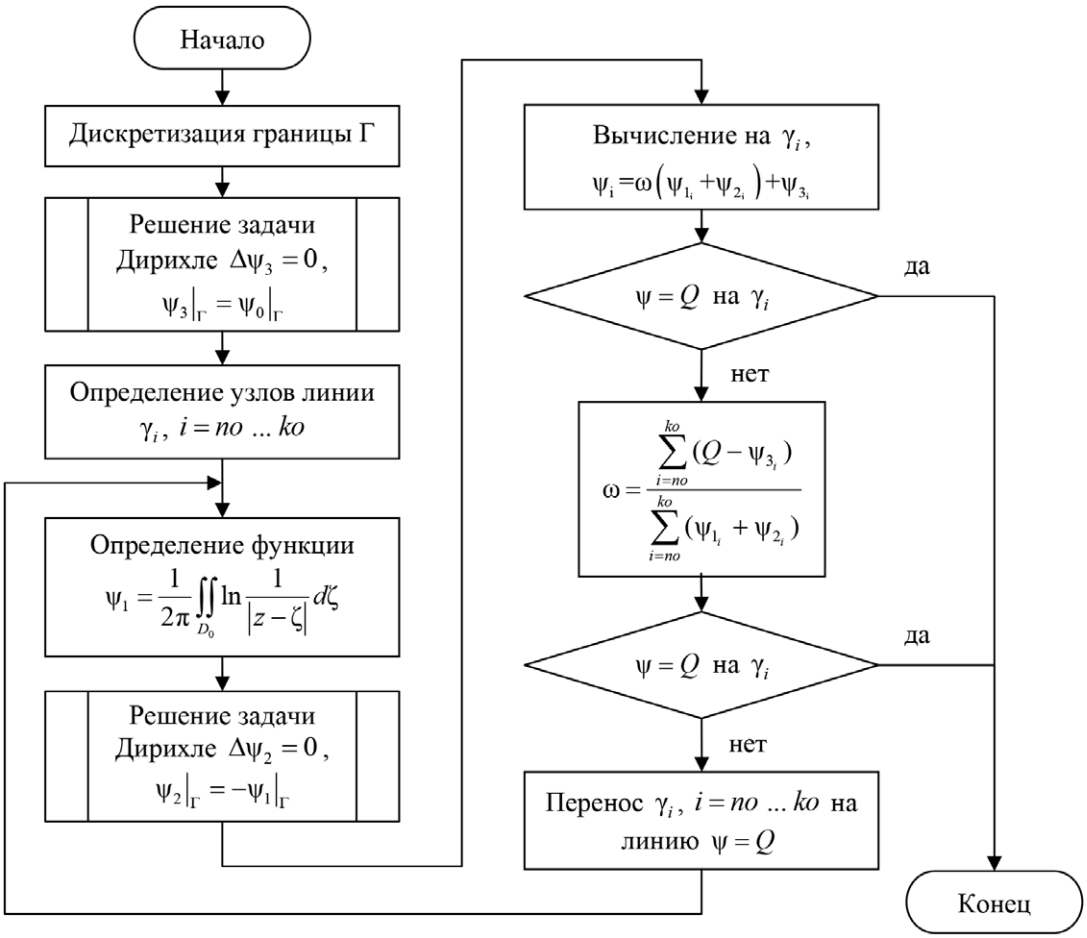


Рис. 2. Блок-схема алгоритма

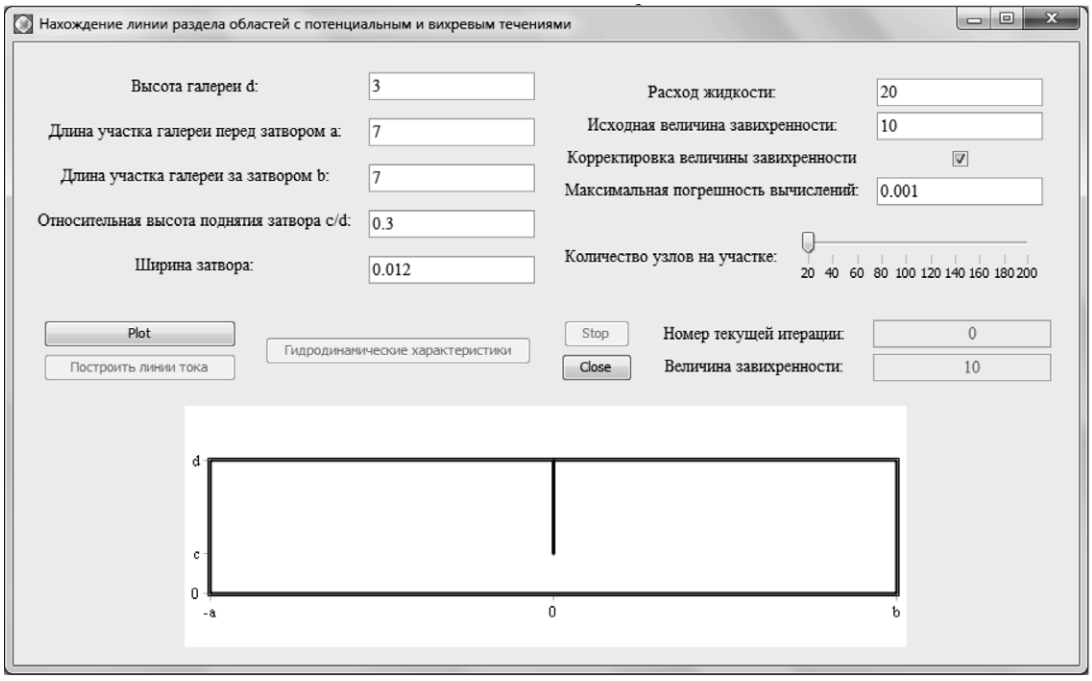


Рис. 3. Интерфейс программы

Приведем результаты расчетов. На рис. 4, *а* приведены линии уровня функции тока, полученные методом граничных элементов на основе модели Лаврентьева для расчета вихревых областей за препятствиями, на рис. 4, *б* — линии, полученные методом конечных элементов на основе решения уравнений неразрывности, сохранения импульса и энергии. В результате выполнения программы на основе метода граничных элементов и метода конечных элементов за затвором четко прослеживается *отрыв потока*. Вихревая область, полученная во второй модели, заполняет весь доступный объем, в то время как вихревая область, полученная в программе на основе метода граничных элементов — в первой модели, имеет конечные размеры.

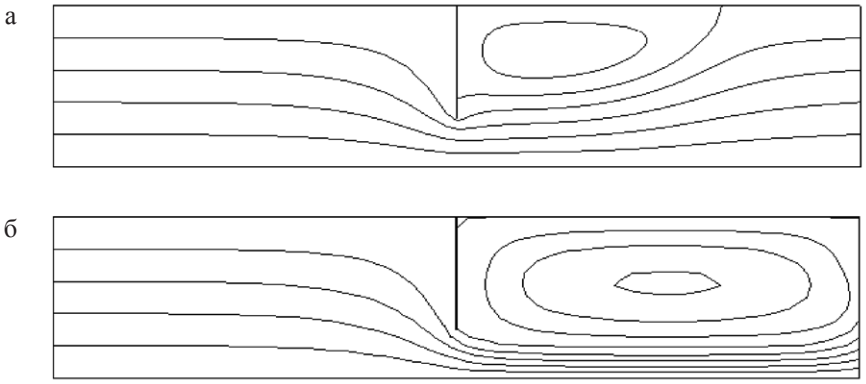


Рис. 4. Линии уровня функции тока:
а — метод граничных элементов; *б* — метод конечных элементов

Сравним численные значения параметров движения. На рис. 5 представлены скорости течения при различных разрезах рассматриваемой области. На рис. 5 и 6 жирной линией показан алгоритм на основе метода граничных элементов, тонкой линией — алгоритм на основе метода конечных элементов.

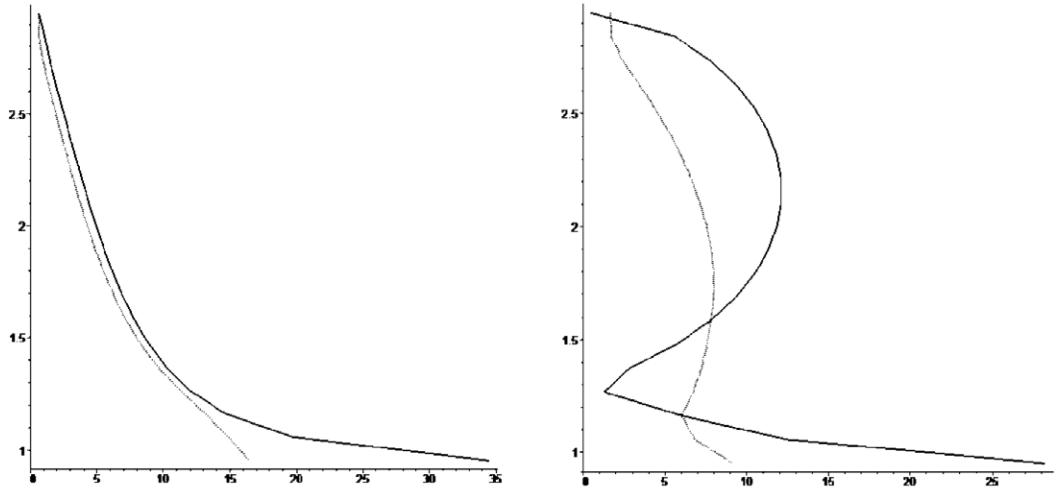


Рис. 5. График скорости течения:
а — скорость перед затвором; *б* — скорость за затвором

Наибольший интерес представляют скорости течения жидкости вблизи затвора. Можно считать, что применение моделей для вычисления скоростей течения у затвора дает схожий результат, но вычислительные средства модели на основе метода конечных элементов существенно сложнее. На рис. 6 приведен график результирующего давления на затвор. Как и в случае скоростей, результаты согласованы и подтверждают те же выводы: схожий результат и сложность реализации метода конечных элементов.

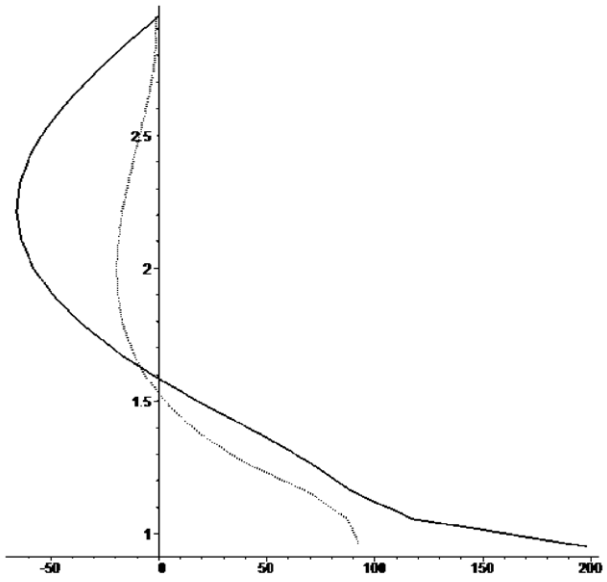


Рис. 6. График результирующего давления

Выводы

Программная реализация алгоритма, основанного на применении метода граничных элементов, проще по сравнению с реализацией алгоритма, основанного на методе конечных элементов, в частности в части генерации конечно-элементной сетки для вычислений. В методе граничных элементов дискретизации подвергается лишь граница области. Результаты расчета по обеим схемам согласованы и показывают, что при обтекании затвора потоком невязкой жидкости за ним возникает зона вихревого течения, давления на затвор имеют разнонаправленный характер, поэтому следует учитывать момент сил давления.

Список литературы

1. *Лаврентьев М. А.* Проблемы гидродинамики и их математические модели / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. — 416 с.

2. *Вайнштейн И. И.* Модель М. А. Лаврентьева о склейке вихревых и потенциальных течений идеальной жидкости / И. И. Вайнштейн, П. С. Литвинов // Вестник СибГАУ. — 2009. — № 3(24). — С. 7–9.

3. *Потапов Д. К.* Непрерывные аппроксимации задачи Гольдштика / Д. К. Потапов // Математические заметки. — 2010. — Т. 87. — № 2. — С. 262–266.

4. *Васин А. В.* Определение линии раздела областей вихревых течений / А. В. Васин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10, Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2013. — № 1. — С. 3–10.

5. *Васин А. В.* Определение линии раздела областей с потенциальным и вихревым течениями / А. В. Васин, О. А. Тимофеева // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2 (14). — С. 8–13.

6. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. — Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. — 572 с.

7. *Гольдштик М. А.* Вихревые потоки / М. А. Гольдштик. — Новосибирск: Наука (Сиб. отд.), 1981. — 368 с.

8. *Vasin A. V.* Simulation of the Dynamic Loads and Calculation of Plane Lock Bypass Galleries. / A. V. Vasin, D. P. Goloskokov // Proceedings of ICCTPEA-2014, Saint-Petersburg, Russia, June 30 – July 04, 2014. — P. 197–198.

9. *Васин А. В.* Расчет плоских затворов судоходных шлюзов на динамическое воздействие / А. В. Васин, Д. П. Голоскоков // Межд. науч.-практ. конф. ИТОН – 2014: материалы конф. и тр. семинара / под ред. Ю. Г. Игнатьева. — Казань: Изд-во «Фолиант», 2014.

10. *Васин А. В.* Математическое моделирование динамических нагрузок на гидрозатворы / А. В. Васин // Некоторые актуальные проблемы современной математики и математического образования. Герценовские чтения – 2013: материалы науч. конф., 15 – 20 апреля 2013 г. — СПб.: Изд. РГПУ им. А. И. Герцена, 2013. — С. 36–40.

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

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 539.04

Т. О. Карклина,
канд. техн. наук;

А. В. Павлов,
асп.;

В. Б. Чистов,
д-р техн. наук, проф.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО ПЕРЕГИБА КОРПУСА СУДНА

ENHANCCE THE ACCURACY OF RESIDUAL DEFLECTIO HULL

В связи со старением флота, общие остаточные деформации (прогиб, перегиб) все чаще встречаются на судах класса «река – море» плавания. Главной задачей является определение ординат остаточной стрелки перегиба. Статья посвящена проблеме измерения остаточного общего перегиба корпуса судна. В статье приведены различные методики вычисления ординат изогнутой оси корпуса судна, а также примеры остаточных изогнутых осей судов типа «Волгонефть» и «Волго-Дон» с общими остаточными деформациями. На примере судов типа «Волгонефть» приведен сравнительный анализ остаточных изогнутых осей, вычисленных по традиционной методике и по патентованной методике д-ра техн. наук, проф. С.О. Барышникова. На основании выполненного анализа выбран наиболее эффективный способ определения ординат остаточной стрелки перегиба судна и предложен способ повышения точности измерения ординат изогнутой оси.

Total residual strains (deflection, inflection) are increasingly common on river-sea navigation vessels of. The main objective is to determine the ordinate of the total residual inflection. The article is devoted to the problem of measuring ordinate for the total residual inflection of the ship hull. The article presents different methods of calculating the total residual hull inflection, as well as examples of residual inflection of hulls of «Volgoneft» and «Volga-Don» ship types, calculated according to these techniques. By way of example of the «Volgoneft» vessel type comparative an analysis of residual curved axles was done based on calculations according to the traditional method and the patented method by S.O. Baryshnikov. And on the basis of the analysis we selected the most effective way to determine the residual ship hull inflections and a more effective method for improving the accuracy of measurements of residual total inflection ordinate was proposed.

Ключевые слова: остаточные деформации, остаточная изогнутая ось, корпус судна, изгибающий момент, кривизна.

Key words: residual strains, residual curved axis, hull, bending moment, curvature.

В НАСТОЯЩЕЕ время все чаще стали встречаться суда «река – море» плавания с общими остаточными деформациями. Причин возникновения такого дефекта несколько [1], [2]. К подобному роду повреждений может привести неправильная технология ремонта, чрезмерные нагрузки при эксплуатации и погрешности спускового устройства (слипа) при спуске на воду. Общие остаточные деформации корпуса вызывают появление после ремонта в крайних связях эквивалентного бруса остаточных напряжений, которые могут вызвать снижение коэффициента запаса на выносливость [3] и появление поправок к редукционным коэффициентам продольных ребер жесткости [4]. В [5], на примере теплохода типа «Невский», был выполнен расчет возможных остаточных напряжений при различных способах ремонта. На основании полученных результатов вычислений видно, что остаточные напряжения при всех видах ремонта будут существенными.

Все эти обстоятельства являются основными причинами, побуждающими к тому, чтобы остаточный общий перегиб учитывался при оценке технического состояния корпуса судна и разработке технологических процессов его ремонта.

До недавнего времени на практике определение остаточной стрелки прогиба включало измерение ординаты изогнутой оси под нагрузкой и вычитание из нее упругого прогиба от этой нагрузки:

$$Y_{\text{ост}} = Y_{\text{изм}} - Y_{\text{упр}} - Y_t, \tag{1}$$

где $Y_{\text{изм}}$ — измеренный прогиб; $Y_{\text{упр}}$ — упругий прогиб; Y_t — прогиб от неравномерного нагрева по высоте корпуса.

Измерения прогиба корпуса на плаву можно производить с помощью геодезических приборов по специальным методикам или с использованием аппроксимированной параболы второй степени изогнутой оси по результатам измерения трех осадок на корпусе [6]

$$Y_{\text{изм}} = px^2 + qx + h. \tag{2}$$

Здесь x — координата по длине корпуса; p, q, h — постоянные, которые можно определить по формулам:

$$\left.\begin{aligned} p &= \frac{T_{\otimes}L_3 - T_{\text{Н}}L_2 - T_{\text{К}}(L_3 - L_2)}{L_2L_3(L_2 - L_3)} \\ q &= \frac{T_{\otimes}L_3^2 - T_{\text{Н}}L_2^2 - T_{\text{К}}(L_3^2 - L_2^2)}{L_2L_3(L_2 - L_3)} \\ h &= T_{\text{К}} \end{aligned}\right\}, \tag{3}$$

где $T_{\otimes}$, $T_{\text{Н}}$, $T_{\text{К}}$ — осадка на миделе, носом и кормой соответственно; L_2, L_3 — места расположения измерения осадки по длине судна на миделе и корме соответственно.

Сложность выполнения данной задачи заключается в том, что необходимо вычислять упругий прогиб методами строительной механики корабля [7], которые не учитывают изменение момента инерции поперечного сечения корпуса по длине вследствие износа, приобретаемого во время эксплуатации. По этой причине наличие этого дефекта не учитывалось раньше при оценке технического состояния корпуса судна, если отсутствовали признаки наметившего перелома.

Доктором технических наук, профессором С. О. Барышниковым [8] был запатентован способ определения ординат остаточной изогнутой оси корпуса. Формула для расчета имеет вид

$$y_{\text{ост}}(x) = \frac{\sum_i^n c_i l_i \left(L - L_i\right)}{L} x - \sum \left(\left. \frac{c_i \left(x - \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right) \right)^2}{2} \right|_{x^3 \geq \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right)} - \left. \frac{c_i \left(x - \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right) \right)^2}{2} \right|_{x^3 \geq \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right)} \right), \tag{4}$$

где $y_{\text{ост}}(x)$ — ордината изогнутой оси корпуса; L_i — расстояние от кормового перпендикуляра на 20-м практическом шпангоуте до середины участка с заданной кривизной; l_i — длина участка с заданной кривизной; c_i — кривизна на i-м участке, определяемая по формуле $c_i = \frac{8f_i}{l_i^2}$; f_i — высота хорды на участке с постоянной кривизной, определяемая по результатам измерений отклонений от горизонтальной плоскости; L — длина судна между перпендикулярами; $x \geq \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right)$ и $x \geq \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right)$ — показатели, указывающие на то, что слагаемые учитываются только в том случае, когда выражение в скобках, возводимое в квадрат, имеет положительное значение.

При выводе зависимости (4) принимались следующие допущения:

1) корпус судна имеет остаточную кривизну только на тех участках, где произошли пластические деформации;

2) участки для измерения кривизны располагаются в средней части корпуса судна;

3) считается, что кривизна корпуса, измеренная на палубе или днище, совпадает с кривизной нейтрального слоя;

4) для определения остаточного прогиба (перегиба) используется графоаналитический способ определения перегиба балок, при котором прогиб равен изгибающему моменту фиктивной балки, загруженной фиктивной распределенной нагрузкой интенсивностью, равной кривизне балки.

Первое допущение можно даже не считать таковым. Из определения остаточной деформации следует, что при оценке на объект не должна действовать внешняя нагрузка, и, значит, на участках, где не произошли пластические деформации, кривизна меняться не будет.

Второе допущение в части расположения измеряемых углов можно считать приемлемым, так как в средней части корпуса действуют наибольшие изгибающие моменты в эксплуатации и поэтому здесь следует ожидать появление остаточной кривизны.

Третье допущение может дать погрешность в определении кривизны на измеряемом участке, не превышающую 0,5 %, такая же погрешность будет для рассчитанных стрелок прогиба корпуса.

При измерении кривизны на участках судно находится под нагрузкой (действуют силы веса, силы поддержания), поэтому остаточная кривизна на участке должна быть определена по формуле

$$c_i^{\text{ост}} = c_i^{\text{изм}} - c_i^{\text{упр}}, \tag{5}$$

где $c_i^{\text{изм}}$ — кривизна, вычисляемая по формуле $c_i = \dfrac{8f_i}{l_i^2}$ после измерения стрелки прогиба на участке длиной l или по разности отклонений от горизонтальной плоскости в середине или по краям участка; $c_i^{\text{упр}}$ — кривизна, созданная изгибающим моментом от внешней нагрузки на данном участке, определяемая по формуле

$$c_i^{\text{упр}} = \frac{M}{EJ}, \tag{6}$$

где M — максимальный изгибающий момент от внешней нагрузки, действующий на участке, где выполняются измерения; E — модуль нормальной упругости для стали; J — момент инерции поперечного сечения корпуса на участке, где выполняются измерения.

Для судов типа «Волгонефть», у которых максимальный изгибающий момент на тихой воде $M = 60000$ кН·м, а момент инерции $J = 3$ м^4, кривизна, созданная изгибающим моментом, будет равна

$$c_i^{\text{упр}} = \frac{60000 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^6} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м.}$$

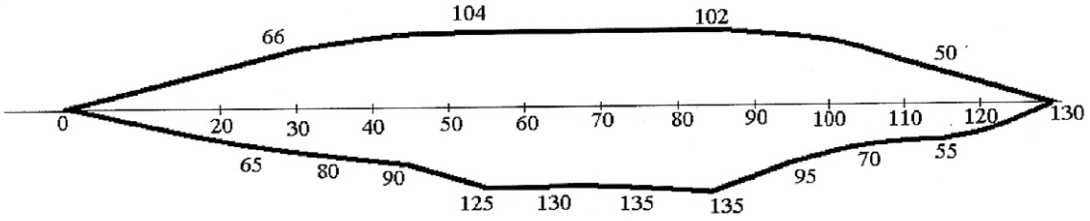
Для судов типа «Волго-Дон», у которых максимальный изгибающий момент на тихой воде $M = 70000$ кН·м, а момент инерции $J = 3{,}5$ м^4, кривизна, созданная изгибающим моментом, будет равна

$$c_i^{\text{упр}} = \frac{70000 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 3{,}5 \cdot 10^6} = 0{,}9 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м.}$$

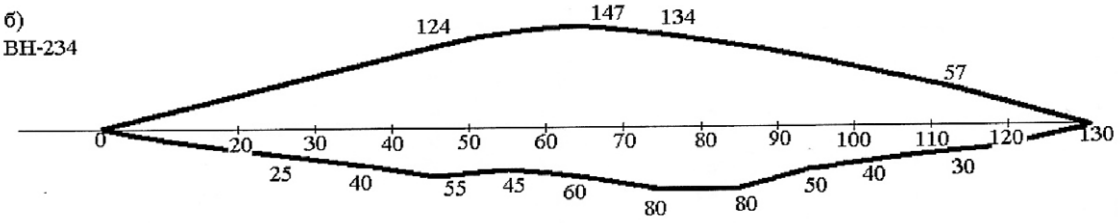
Статистических данных об общих остаточных деформациях крайне мало, что не позволяет выявить их зависимость от времени, места эксплуатации, выполненных ремонтов и грузовых операций.

Первые сведения об общих остаточных деформациях содержатся в работах В. Д. Дринкова и относятся к нефтеналивным баржам. Несколько позднее в своих трудах И. А. Гунин представил данные по сухогрузным судам. Общие остаточные деформации судов типа «Волгонефть» исследовались в трудах Т. О. Карклиной. Перечисленные работы были опубликованы более 25 лет назад. Сейчас данные об остаточных изогнутых осях корпусов судов, полученные за последние пятьдесят лет, можно найти в [3], [8], [9]. В публикации [3] представлены результаты расчета остаточного общего прогиба по формуле (1) и результаты измерений ординат остаточной изогнутой оси танкеров типа «Волгонефть». На рис. 1 приведены результаты этих расчетов.

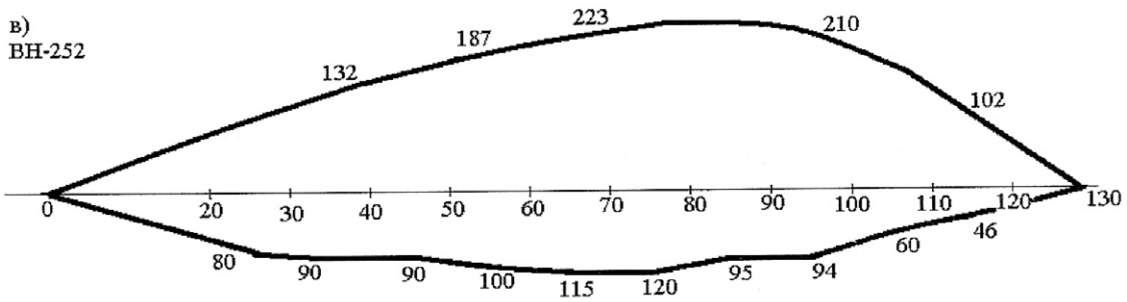
а)



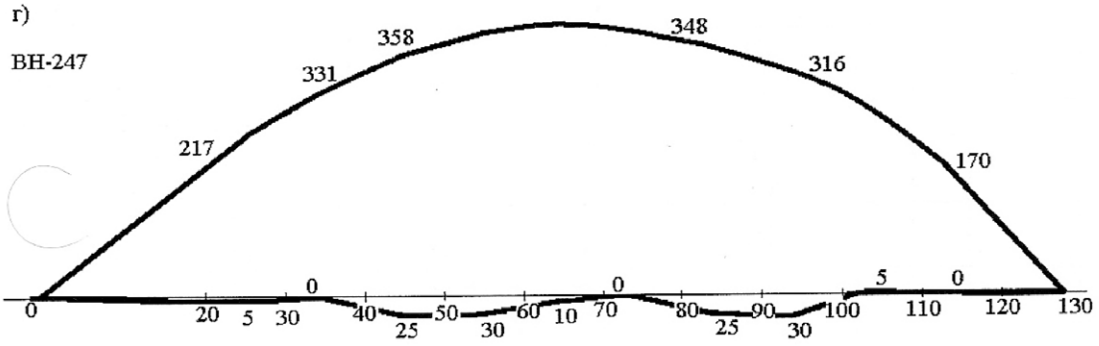
б)
ВН-234



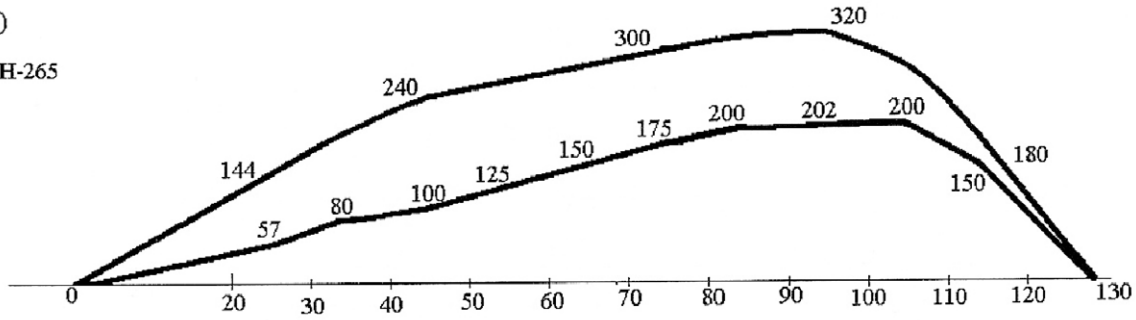
в)
ВН-252



г)
ВН-247



д)
ВН-265



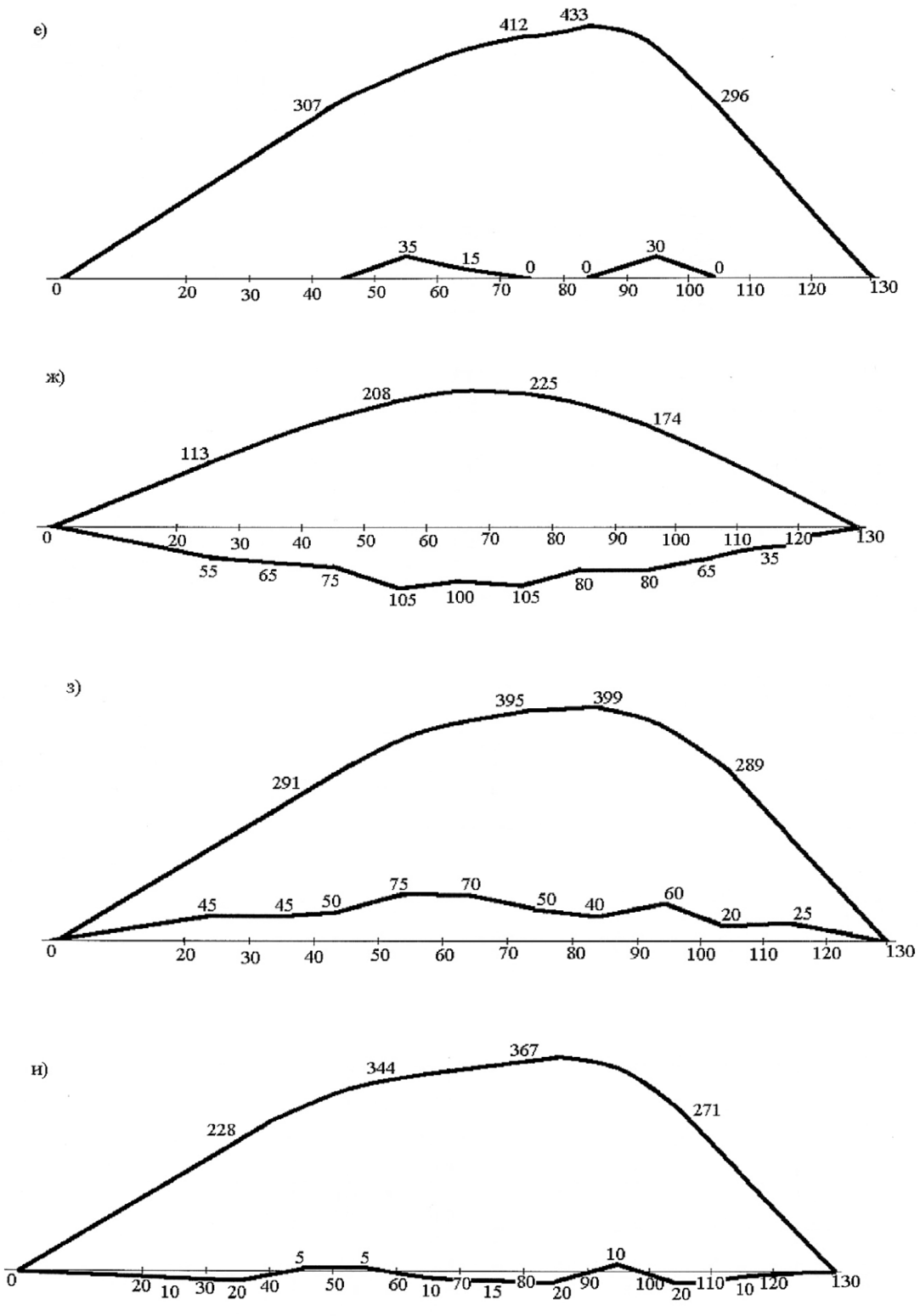


Рис. 1. Ординаты изогнутой оси танкера типа «Волгонефть», в грузу и остаточный:
ВН-251 (*а*); ВН-234 (*б*); ВН-252 (*в*); ВН-247 (*г*); ВН-265 (*д*); ВН-130 (*е*); ВН-140 (*ж*); ВН-168 (*з*); ВН-169 (*и*)

Данные об измеренных ординатах остаточных изогнутых осей пополняются. Нами были получены и обработаны данные по четырем судам типа «Волгонефть». Результаты расчетов ординат остаточной изогнутой оси по патентованному и традиционному методам были сопоставлены и представлены на рис. 2.

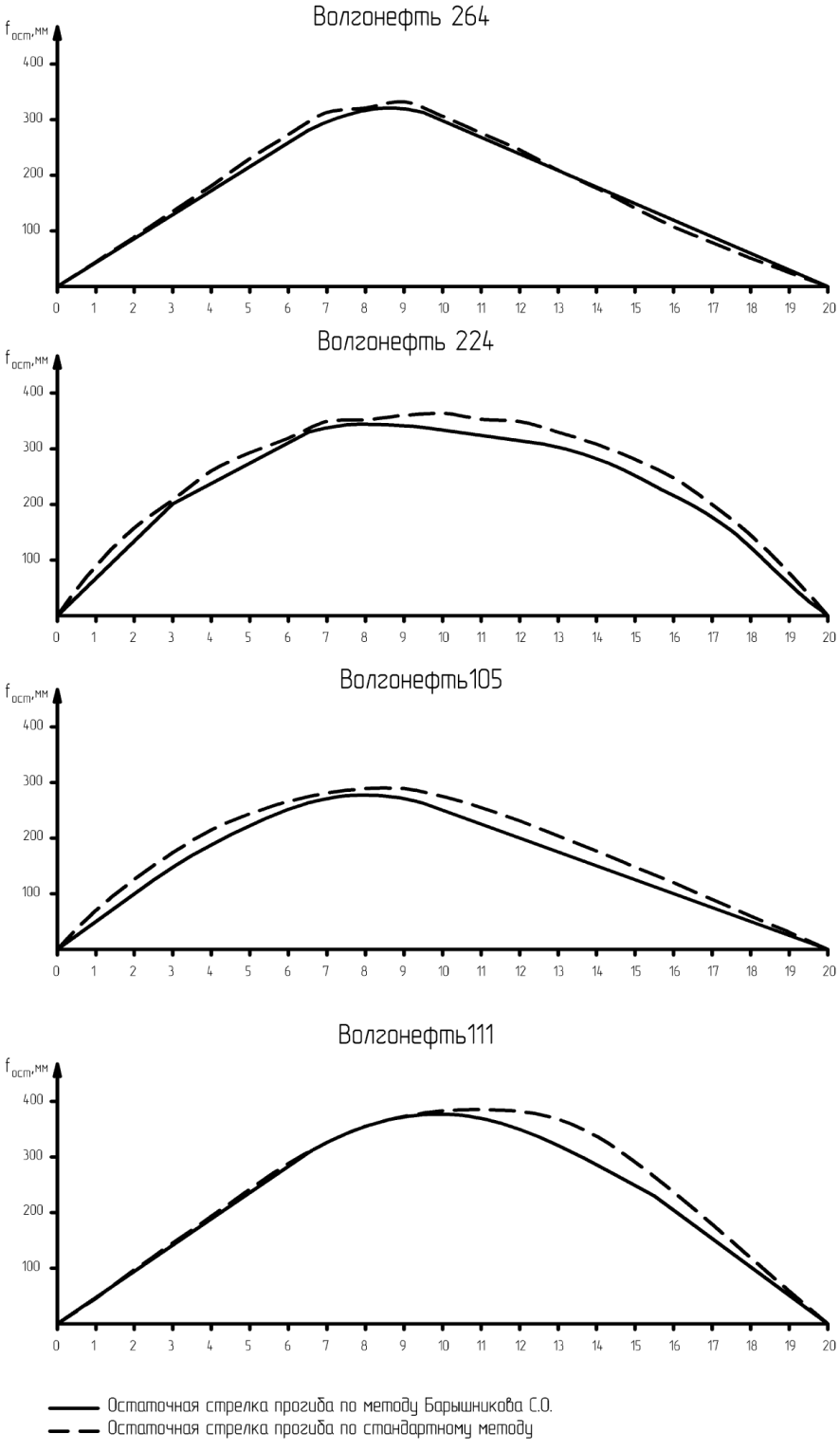


Рис. 2. Результаты расчетов ординат остаточной изогнутой оси
по патентованному и традиционному методам для судов типа «Волгонефть»

В ОАО «ИЦС» при выполнении работ по правке корпусов судов типа «Волго-Дон» была использована патентованная методика для вычисления остаточной изогнутой оси. В [10] представлен результат расчета изогнутой оси судна типа «Волго-Дон» по методике С. О. Барышникова. Результаты приведены на рис. 3.

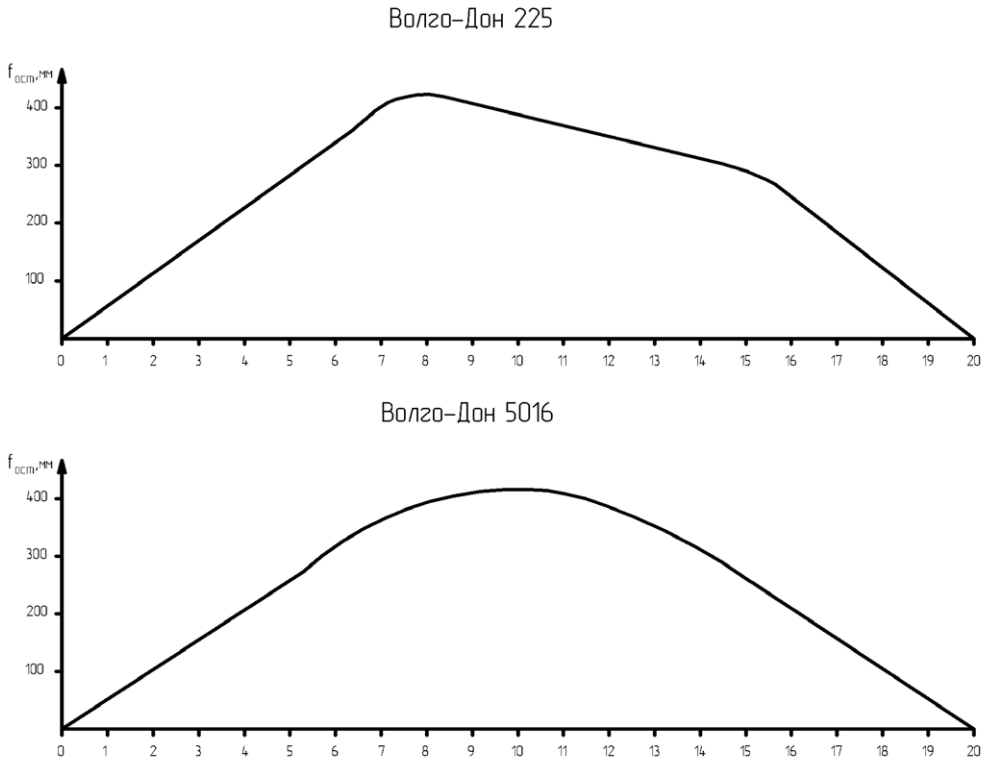


Рис. 3. Остаточная изогнутая ось для судов типа «Волго-Дон»

В результате расчетов остаточных изогнутых осей были получены значения кривизны на различных участках, которые представлены в таблице:

Значение кривизны в зависимости от длины расчетного участка

Название судна	Длина участка l_i, м	Измеренная стрелка прогиба f_i, м	Кривизна c_i, 1/м
Волгонефть 264	12,86	$21{,}05 \cdot 10^{-3}$	$1{,}04 \cdot 10^{-3}$
	12,86	$14{,}73 \cdot 10^{-3}$	$0{,}71 \cdot 10^{-3}$
Волгонефть 224	12,86	$14{,}20 \cdot 10^{-3}$	$0{,}69 \cdot 10^{-3}$
	25,72	$24{,}99 \cdot 10^{-3}$	$0{,}30 \cdot 10^{-3}$
	18,30	$18{,}30 \cdot 10^{-3}$	$0{,}22 \cdot 10^{-3}$
Волгонефть 105	30,00	$25{,}20 \cdot 10^{-3}$	$0{,}22 \cdot 10^{-3}$
	15,00	$8{,}70 \cdot 10^{-3}$	$0{,}31 \cdot 10^{-3}$
Волгонефть 111	20,00	$12{,}00 \cdot 10^{-3}$	$0{,}24 \cdot 10^{-3}$
	12,86	$7{,}20 \cdot 10^{-3}$	$0{,}34 \cdot 10^{-3}$
Волго-Дон 5016	13,80	$3{,}50 \cdot 10^{-3}$	$0{,}147 \cdot 10^{-3}$
	16,20	$4{,}50 \cdot 10^{-3}$	$0{,}137 \cdot 10^{-3}$
	20,40	$24{,}00 \cdot 10^{-3}$	$0{,}461 \cdot 10^{-3}$
	15,60	$3{,}30 \cdot 10^{-3}$	$0{,}108 \cdot 10^{-3}$
Волго-Дон 225	7,20	$3{,}00 \cdot 10^{-3}$	$0{,}463 \cdot 10^{-3}$
	7,20	$7{,}00 \cdot 10^{-3}$	$1{,}08 \cdot 10^{-3}$
	7,20	$5{,}00 \cdot 10^{-3}$	$0{,}77 \cdot 10^{-3}$

Проанализировав результаты расчета остаточного общего перегиба и кривизны, представленных на рис. 1 – 3 и в таблице, следует отметить, что точность определения остаточного общего перегиба в значительной степени зависит от учета упругой составляющей. Наименьшая кривизна изогнутой оси корпуса в деформированной части будет в том случае, когда деформированный участок распространяется на всю среднюю часть, как показано на рис. 4, *а*.

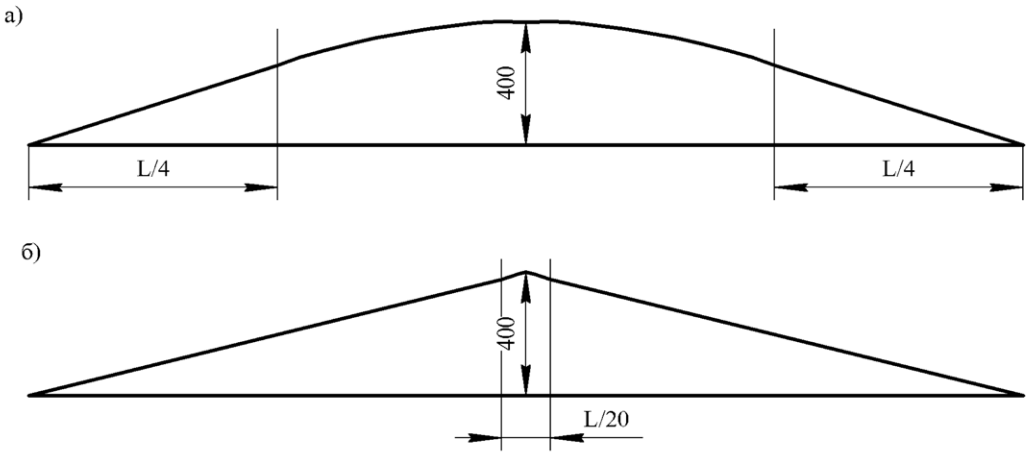


Рис. 4. Кривизна изогнутой оси корпуса в деформированной части:
деформированный участок корпуса судна расположен в средней части (*а*);
деформированный участок расположен по длине *L*/20 (*б*)

Изогнутая ось в этом случае определяется уравнением

$$y(x) = c_i \cdot \frac{L}{2} \cdot x - \left(\left. \frac{c_i \cdot \left(x - \frac{L}{4} \right)^2}{2} \right|_{x \ge \frac{L}{4}} - \left. \frac{c_i \cdot \left(x + \frac{3L}{4} \right)^2}{2} \right|_{x \ge \frac{3L}{4}} \right), \tag{7}$$

где первое слагаемое в скобках учитывается при $x \ge \frac{L}{4}$, а второе слагаемое — при $x \ge \frac{3L}{4}$.

Для стрелки прогиба на миделе после преобразования зависимости (7) получим

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{3}{32} c_i L^2. \tag{8}$$

Зададимся значением максимальной стрелки перегиба судна типа «Волгофнеть» $y\left(\frac{L}{2}\right) = 0{,}4$ м. Кривизна в средней части корпуса судна длиной 140 м в этом случае

$$c_{\text{изм}} = 2{,}18 \cdot 10^{-4},\ 1/\text{м}.$$

Ранее было определено, что кривизна от упругого изгиба для судна типа «Волгонефть» $c_{\text{упр}} = 1 \cdot 10^{-4}$ 1/м. Тогда остаточная кривизна будет равна

$$c_{\text{ост}} = c_{\text{изм}} - c_{\text{упр}} = 1{,}18 \cdot 10^{-4},\ 1/\text{м}. \tag{9}$$

Подставив значение остаточной кривизны в формулу (8), получим величину остаточной стрелки прогиба на миделе:

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{3}{32} c_i L^2 = 0{,}217 \text{ м}.$$

Доля максимального остаточного перегиба от измеренного (0,4 м) при форме изогнутой оси, показанной на рис. 4, *а*, составляет всего 0,54 и будет уменьшаться по мере приближения максимального измеренного к максимальному упругому.

На практике, на изогнутой оси корпуса значительная кривизна концентрируется лишь на одном – трех небольших по длине участках, существенно меньших, чем длина средней части (рис. 4, *б*). Если такой слом расположен на миделе, то из зависимости (7) получим

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right)=\frac{cl}{2}\left(L-\frac{1}{4}\right). \tag{10}$$

Если принять остаточную кривизну, распространившуюся только на участке $1=\frac{L}{20}$, значение максимальной остаточной стрелки прогиба получим по формуле

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right)=\frac{79}{3200}c_iL^2=0{,}0247c_iL^2. \tag{11}$$

При максимальной стрелке перегиба 0,4 м на участке $\frac{1}{20}L$ измеренная кривизна будет равна $c_{\text{изм}} = 8{,}27 \cdot 10^{-4}$ 1/м, а остаточная на этом участке $c_{\text{ост}} = 7{,}27 \cdot 10^{-4}$ 1/м. Максимальная остаточная стрелка перегиба после подстановки значений в формулу (12)

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right)=0{,}352 \text{ м}.$$

Доля максимального остаточного перегиба от измеренного (0,4 м) при форме изогнутой оси, показанной на рис. 4, *б*, составляет 0,88 и будет уменьшаться по мере приближения максимального измеренного к максимальному упругому.

На рис. 5 представлен график зависимости длины участка от отношения максимально измеренной координаты остаточной изогнутой оси к максимальной координате остаточной изогнутой оси для судов типа «Волгонефть».

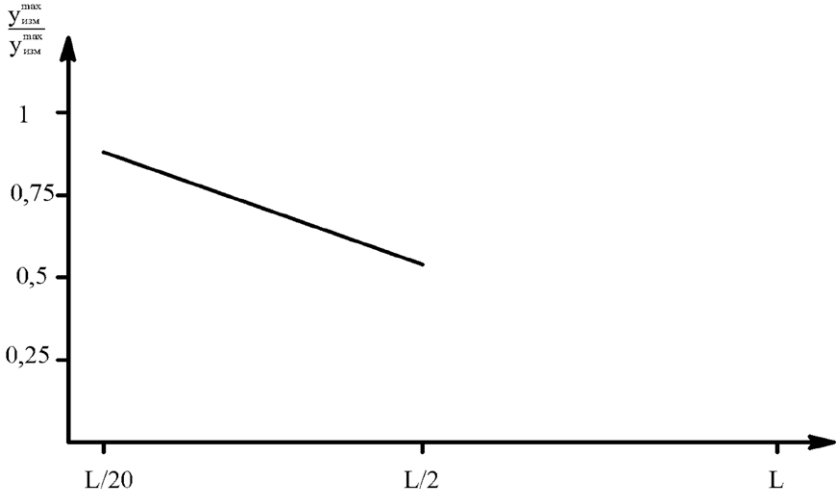


Рис. 5. Зависимость длины участка *l* от отношения $\frac{y_{\text{ост}}^{\max}}{y_{\text{изм}}^{\max}}$

Определение кривизны на отдельных участках выполняется на основании отклонений от горизонтальной плоскости по высоте хорды на заданном участке. Высота хорды определяется по формуле

$$f=y\left(L_i\right)-\frac{y\left(L_i+\frac{l}{2}\right)-y\left(L_i-\frac{l}{2}\right)}{2}. \tag{12}$$

Высота хорды в случае, представленном на рис. 4, *б*, равна 5,1 мм, а высота хорды при упругом изгибе равна 0,61 мм, последнее значение находится в пределах точности измерений отклонений от горизонтальной плоскости.

Таким образом, после проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– при вычислении остаточной изогнутой оси по патентованной методике результат получается более точным, чем по традиционному методу. Это достигается тем, что при вычислении не требуется знать изменение момента инерции корпуса судна по длине из-за износа;

– по результатам расчетов по патентованной методике сразу видно, на каких участках корпуса судна наибольшая кривизна и где необходимо будет выполнить частичный разрез для правки корпуса;

– кривизна корпуса судна зависит от длины участка. Если длина участка составляет менее $\frac{L}{10}$, то остаточная кривизна равна измеренной. Если длина участка более $\frac{L}{10}$, то остаточная кривизна будет определяться как разность значений измеренной и упругой кривизны.

Список литературы

1. *Барышников С. О.* Общие остаточные деформации корпусов судов / С. О. Барышников, Т. О. Карклина // Вестник ИНЖЭКОНа. Сер.: Технические науки. — 2010. — № 8. — С. 124–128.

2. *Бойцов Г. В.* Анализ и оценка остаточных деформаций корпусов судов смешанного плавания при пониженных запасах устойчивости их продольного набора / Г. В. Бойцов, А. В. Александров, О. С. Андудинов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2006. — № 28. — С. 16–23.

3. *Барышников С. О.* Устранение остаточного перегиба корпусов судов / С.О. Барышников. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2011.

4. *Павлов А. В.* Влияние остаточных напряжений на редукционные коэффициенты ребер жесткости / А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 60–64.

5. *Павлов А. В.* Остаточные напряжения в корпусе судна теплохода «Невский» при ремонте / А. В. Павлов // Материалы VI Межвуз. науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 14 мая 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2015. — С. 151–155.

6. *Барышников С. О.* Общие остаточные деформации корпусов судов / С. О. Барышников, Т. О. Карклина // Речной транспорт XXI век. — 2010. — № 6. — С. 87–91.

7. *Давыдов В. В.* Справочник по прочности судов внутреннего плавания / В. В. Давыдов, Н. В. Матесс, И. Н. Сиверцев. — М.: Речной транспорт, 1958.

8. *Барышников С. О.* Определение остаточного общего прогиба (перегиба) корпуса судна / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Морской вестник. — 2011. — № 1. — С. 109–112.

9. *Егоров Г. В.* Анализ общих остаточных деформаций корпусов судов и обоснование допускаемой их величины / Г. В. Егоров, Фам Ван Туан // Зб наук. прац. НУК. — 2009. — № 5 (428). — С. 8–17.

10. *Ефименков Ю. И.* Устранение остаточного перегиба корпуса судна теплохода «Волго-Дон 225» / Ю. И. Ефименков, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Труды ЦНИИМФ. — 2015. — С. 25–32.

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

УДК 624.073.5

Д. П. Голоскоков,
д-р техн. наук, проф.

РАСЧЕТ ПЛОСКИХ ПЕРЕКРЫТИЙ В СИСТЕМАХ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

CALCULATION OF PLANE OVERLAPPINGS IN SYSTEM OF SYMBOLICAL CALCULATIONS

В статье рассмотрен приближенный метод расчета плоских балочных перекрытий, применяемых в судовых конструкциях — днищ, бортов, палуб и переборок корабля; в строительных конструкциях — перекрытиях помещений; в гидротехническом строительстве — в качестве расчетной схемы плоского стального затвора гидротехнических сооружений или створки ворот судоходного шлюза. Предлагается математическая модель плоского перекрытия, работающего на изгиб, основанная на идее метода Навье: прогибы балок главного направления и перекрестных балок приравниваются в узловых точках. Излагается новый подход к расчету перекрестной системы балок, использующий обобщенные функции: дельта-функцию Дирака и единичную функцию Хэвисайда. С помощью дельта-функции моделируются сосредоточенные воздействия — узловые реакции взаимодействия пересекающихся балок. Приводятся результаты расчета перекрытия, состоящего из пяти балок главного направления и трех перекрестных балок. Балки обоих направлений жестко защемлены. Все необходимые расчеты выполнены в системе символьных вычислений Maple. Рассмотренный пример показывает эффективность применения метода Навье в совокупности с системой аналитических вычислений Maple к расчету балочных перекрытий различного назначения.

In article the approximate method of calculation of the beam's flat overlapping applied in shipbuilding — the bottoms, boards, decks and partitions of the ship, building constructions — floorings of premises, in hydraulic engineering — as the computing scheme of a flat steel lock of hydraulic engineering construction or a wing of gate of a navigable canal lock is considered. The mathematical model of the flat overlapping working on curving. Is offered, based on idea of a method of Navier — deflections of beams of a main beams and cross beams are equated in nodal points. The new approach to calculation of cross system of the beams, using generalised functions — a delta-function of Dirac and unit function of Heaviside is stated. With the help of delta-function the concentrated actions — central responses of interaction of intersected beams are modelled. Results of calculation of the overlapping consisting of five beams of a main beams and three cross beams are observed. Beams of both directions are rigidly jammed. All necessary calculations are fulfilled in system of symbolical evaluations Maple. The considered example shows efficiency of application of a method of Navier in aggregate with system of analytical evaluations Maple to calculation of beam's flat overlapping of different function.

Ключевые слова: плоское перекрытие, балка, метод Навье, дельта-функция Дирака, функция Хэвисайда, уравнение изгиба балки.

Key words: plane overlapping, beams, Navier method, the Dirac delta-function, the Heaviside function, the equation of bending beams.

Введение

Плоским перекрытием, как известно, называется система пересекающихся балок (см., например, [1]). Предполагается, что такие балки расположены в одной плоскости и жестко соединены друг с другом в точках пересечения. На такую систему может воздействовать нагрузка в плоскости расположения балок и в направлении нормали к этой плоскости. Предполагается, что балки перекрытия закреплены каким-либо способом на опорном контуре, причем некоторые из них могут быть свободны от закрепления. Главным направлением обычно называется направление, вдоль которого располагается большее число балок. Соответствующие главному направлению балки называются *балками главного направления*. Балки, идущие перпендикулярно главному направлению, называются *перекрестными балками*.

Плоские перекрытия являются элементами многих судовых конструкций — днищ, бортов, палуб и переборок корабля. Такие конструкции имеют в своем составе сплошные настилы, к которым жестко прикрепляются пересекающиеся балки. При расчете таких составных конструкций обычно их заменяют балочными системами по определенным правилам [1]. Например, чтобы учесть работу пластины (обшивки или настила) в составе поперечного и продольного набора балок, вводят в рассмотрение так называемые *присоединенные пояски*, которые включаются в состав балок. После этого конструкция становится системой пересекающихся балок — перекрытием. Для более точного расчета при выборе расчетной схемы перекрытия, конечно, необходимо учитывать наличие пластины (сплошного настила) [2] – [4].

Рассмотренная конструкция плоского перекрытия имеет очень широкую область применения, например, в промышленном и гражданском строительстве (перекрытия помещений), в гидротехническом строительстве такая конструкция может служить в качестве расчетной схемы плоского стального затвора гидротехнических сооружений или створки ворот судоходного шлюза.

Математическая модель работы плоского перекрытия

В данной работе предлагается математическая модель плоского перекрытия, работающего на изгиб, основанная на идее метода Навье: прогибы балок главного направления и перекрестных балок приравниваются в узловых точках [2], [4]. Основными неизвестными являются реакции взаимодействия пересекающихся балок, причем все балки рассматриваются как однопролетные. Балки главного направления находятся под воздействием заданной внешней нагрузки и узловых реакций взаимодействия R_{ij}. На перекрестные балки действуют только реакции взаимодействия балок (рис. 1). Предполагается, что вдоль оси x по линиям $y = y_i$ (i = 1, 2, ..., K_1) расположены K_1 перекрестных балок, изгибные жесткости которых равны $E_{1,i}J_{1,i}$. Вдоль оси y по линиям $x = x_j$ (j = 1, 2, ..., K_2) расположены K_2 балок главного направления, изгибные жесткости которых, соответственно, равны $E_{2,j}J_{2,j}$. Будем считать, что длина главной балки равна b, а длина перекрестной балки равна a: $0 \le x \le a$, $0 \le y \le b$. Граничные условия (условия закрепления концов балок) могут быть любыми.

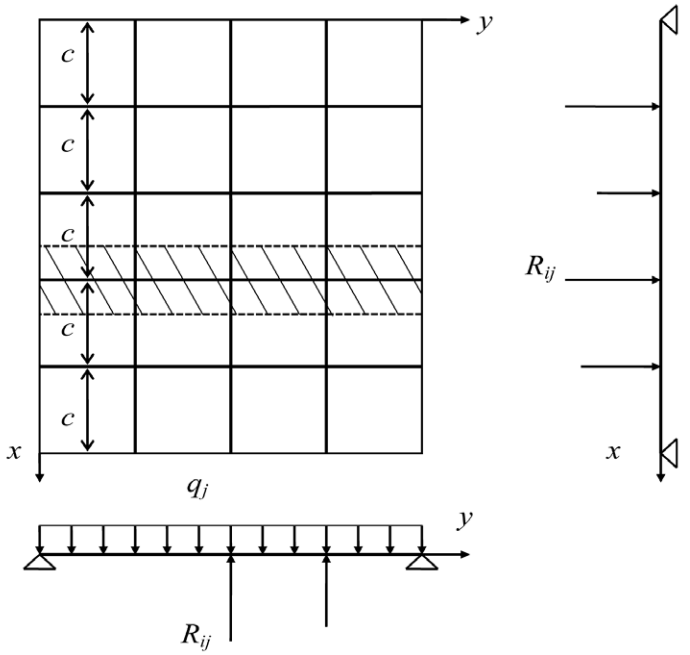


Рис. 1. Расчетная схема перекрытия

Рассмотрим j-ю балку главного направления. Уравнение изгиба ($0 \le y \le b$):

$$E_{2j}J_{2j}\frac{d^4u_j}{dy^4} = q_j - \sum_{i=1}^{K_1} R_{ij}\delta(y - y_i), \qquad (1)$$

где u_j — прогиб j-й балки главного направления; q_j — поперечная нагрузка, действующая на j-ю балку главного направления, которую считаем постоянной; R_{ij} — реакции взаимодействия j-й балки главного направления с i-ми перекрестными балками; сосредоточенные воздействия моделируются с помощью дельта-функций Дирака $\delta(y - y_i)$.

Общее решение уравнения (1) запишем в виде

$$u_j(y) = C_0^j + C_1^j y + C_2^j y^2 + C_3^j y^3 + \frac{q_j y^4}{24E_{2j}J_{2j}} - \sum_{i=1}^{K_1} \frac{R_{ij}}{E_{2j}J_{2j}} \Psi_i^*(y - y_i), \tag{2}$$

где C_k^j ($k = 0,1,2,3$; $j = 1,2,\ldots,K_2$) — произвольные постоянные; функция $\Psi_i^*(y - y_i)$ определяется как частное решение уравнения

$$\frac{d^4 u_j}{dy^4} = \delta(y - y_i) \tag{3}$$

и имеет вид

$$\Psi_i^*(y - y_i) = \frac{(y - y_i)^3}{6}\theta(y - y_i), \tag{4}$$

где $\theta(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi \le 0 \\ 1, & \xi > 0 \end{cases}$ — единичная функция Хэвисайда.

Для определенности рассмотрим случай, когда балки главного направления шарнирно оперты. Условия шарнирного опирания концов балки приводят к уравнениям

$$u_j\big|_{y=0,b} = 0; \quad \left.\frac{d^2 u_j}{dy^2}\right|_{y=0,b} = 0. \tag{5}$$

Из граничных условий (5) находим $C_0^j = 0$, $C_2^j = 0$ ($j = 1, 2,\ldots, K_2$):

$$C_3^j = -\frac{q_j b}{12E_{2j}J_{2j}} + \sum_{i=1}^{K_1} \frac{R_{ij}}{6bE_{2j}J_{2j}} \Psi_i^{*\prime\prime}(b - y_i);$$

$$C_1^j = \frac{q_j b^3}{24E_{2j}J_{2j}} - \sum_{i=1}^{K_1} \frac{bR_{ij}}{6E_{2j}J_{2j}} \left[\Psi_i^{*\prime\prime}(b - y_i) - \frac{6}{b^2}\Psi_i^*(b - y_i)\right],$$

причем

$$\Psi_i^{*\prime\prime}(y - y_i) = (y - y_i)\theta(y - y_i).$$

Таким образом, для функции прогиба j-й балки главного направления будем иметь:

$$u_j(y) = u_j^0(y) - \sum_{i=1}^{K_1} \frac{R_{ij}}{E_{2j}J_{2j}} \Psi_i^0(y);$$

$$u_j^0(y) = \frac{q_j b^4}{24E_{2j}J_{2j}} \left\{\frac{y}{b} - 2\left(\frac{y}{b}\right)^3 + \left(\frac{y}{b}\right)^4\right\};$$

$$\Psi_i^0(y) = \Psi_i^*(y - y_i) + \frac{b^2}{6}\left[\frac{y}{b} - \left(\frac{y}{b}\right)^3\right]\Psi_i^{*\prime\prime}(b - y_i) - \frac{y}{b}\Psi_i^*(b - y_i). \tag{6}$$

В этих формулах остаются пока неизвестными реакции R_{ij}.

Рассмотрим теперь i-ю перекрестную балку. Уравнение изгиба ($0 \le x \le a$):

$$E_{1i}J_{1i}\frac{d^4 v_i}{dx^4} = \sum_{j=1}^{K_2} R_{ij}\delta(x - x_j), \tag{7}$$

где $v_i(x)$ — прогиб i-й перекрестной балки.

Общее решение уравнения (7) имеет вид

$$v_i(x) = D_0^i + D_1^i x + D_2^i x^2 + D_3^i x^3 + \sum_{j=1}^{K_2} \frac{R_{ij}}{E_{1,i} J_{1,i}} \Psi_j^*(x - x_j), \tag{8}$$

где для функции $\Psi_j^*(x - x_j)$ следует использовать формулу (4), в которой надо заменить $y \to x$, $i \to j$, а D_k^i ($k = 0, 1, 2, 3$; $i = 1, 2,\ldots, K_1$) — произвольные постоянные, которые определяются из граничных условий.

Если концы балки шарнирно оперты, то решение задачи определяется формулами (6), в которых следует считать $q_j = 0$ и сделать замену $b \to a$, $i \to j$, $K_1 \to K_2$, $y \to x$. Будем иметь

$$v_i(x) = \sum_{j=1}^{K_2} \frac{R_{ij}}{E_{1i} J_{1i}} \Psi_j^0(x), \quad \Psi_j^*(x - x_j) = \frac{(x - x_j)^3}{6} \theta(x - x_j),$$

$$\Psi_j^0(x) = \Psi_j^*(x - x_j) + \frac{a^2}{6}\left[\frac{x}{a} - \left(\frac{x}{a}\right)^3\right] \Psi_j^{*\prime\prime}(a - x_j) - \frac{x}{a} \Psi_j^*(a - x_j). \tag{9}$$

Если концы балки свободны, то в этом случае граничные условия имеют вид

$$\left.\frac{d^2 v_i}{dx^2}\right|_{x=0,a} = 0, \quad \left.\frac{d^3 v_i}{dx^3}\right|_{x=0,a} = 0. \tag{10}$$

Подставив общее решение (8) в граничные условия (10), получим: $D_2^i = 0$, $D_3^i = 0$ ($i = 1, 2,\ldots, K_1$),

$$\sum_{j=1}^{K_2} R_{ij} \Psi_j^{*\prime\prime}(a - x_j) = 0, \quad \sum_{j=1}^{K_2} R_{ij} \Psi_j^{*(3)}(a - x_j) = 0. \tag{11}$$

Уравнения (11), с учетом формул $\Psi_j^{*\prime\prime}(a - x_j) = a - x_j$ и $\Psi_j^{*(3)}(a - x_j) = 1$, переписываются в виде

$$\sum_{j=1}^{K_2} R_{ij}(a - x_j) = 0, \quad \sum_{j=1}^{K_2} R_{ij} = 0. \tag{12}$$

В левых частях уравнений (12) стоят, соответственно, главный момент и главный вектор сил R_{ij}, действующих на балку с номером i. При этом функция прогиба i-й перекрестной балки вычисляется по формуле

$$v_i(x) = D_0^i + D_1^i x + \sum_{j=1}^{K_2} \frac{R_{ij}}{E_{1i} J_{1i}} \Psi_j^*(x - x_j). \tag{13}$$

В формуле (13) неизвестными являются реакции R_{ij} и константы интегрирования $D_0^i = 0$, $D_1^i = 0$. Для определения этих неизвестных приравниваем прогибы u_j и v_i в узловых точках, т.е. $u_j(y_q) = v_i(x_p)$, $q = 1, 2, ..., K_1$, $p = 1, 2, ..., K_2$, или в явном виде

$$\sum_{j=1}^{K_2} \frac{R_{qj}}{E_{1q} J_{1q}} \Psi_j^*(x_p - x_j) + \sum_{i=1}^{K_1} \frac{R_{ip}}{E_{2p} J_{2p}} \Psi_i^0(y_q - y_i) + C_0^q + C_1^q x_p = u_p^0(y_q). \tag{14}$$

Таким образом, если балки главного направления шарнирно оперты, а перекрестные балки имеют свободные концы, то функции прогибов балок вычисляются по формулам (6) и (13) после определения неизвестных констант из системы уравнений (12) и (14). Если все балки перекрытия шарнирно оперты, то функции прогибов балок находятся по формулам (6) и (9) после определения неизвестных констант из решения следующей системы уравнений

$$\sum_{j=1}^{K_2} \frac{R_{qj}}{E_{1q} J_{1q}} \Psi_j^*(x_p - x_j) + \sum_{i=1}^{K_1} \frac{R_{ip}}{E_{2p} J_{2p}} \Psi_i^0(y_q - y_i) = u_p^0(y_q). \tag{15}$$

Приведем еще расчетные формулы, когда все балки перекрытия жестко защемлены. Этот случай часто встречается на практике.

Функция прогиба j-й балки главного направления вычисляется по формуле

$$u_j(y) = u_j^0(y) - \sum_{i=1}^{K_1} \frac{R_{ij}}{E_{2j}J_{2j}} \Psi_i^0(y), \tag{16}$$

где

$$u_j^0(y) = \frac{q_j b^4}{24 E_{2j} J_{2j}} \left(\frac{y}{b}\right)^2 \left(1 - \frac{y}{b}\right)^2, \tag{17}$$

$$\Psi_i^0(y) = \Psi_i^*(y - y_i) + \left(\frac{y}{b}\right)^2 (b - y)\Psi_i^{*\prime}(b - y_i) + \left(2\left(\frac{y}{b}\right)^3 - 3\left(\frac{y}{b}\right)^2\right)\Psi_i^*(b - y_i). \tag{18}$$

Функция прогиба i-й перекрестной балки находится по формуле

$$v_i(x) = \sum_{j=1}^{K_2} \frac{R_{ij}}{E_{1i}J_{1i}} \Psi_j^0(x), \tag{19}$$

в которой для вычисления функции $\Psi_j^0(x)$ следует воспользоваться формулой (18) с заменой $y \to x$, $y_i \to x_j$, $b \to a$, причем производная функции $\Psi_i^*(y - y_i)$ вычисляется по формуле

$$\Psi_i^{*\prime}(y - y_i) = \frac{(y - y_i)^2}{2}\theta(y - y_i). \tag{20}$$

Неизвестные реакции взаимодействия балок R_{ij} находятся из системы

$$\sum_{j=1}^{K_2} \frac{R_{qj}}{E_{1q}J_{1q}} \Psi_j^0(x_p) + \sum_{i=1}^{K_1} \frac{R_{ip}}{E_{2p}J_{2p}} \Psi_i^0(y_q) = u_p^0(y_q), \tag{21}$$

причем функции $\Psi_j^0(x)$ и $\Psi_i^0(y)$ вычисляются по формуле, аналогичной формуле (18), а функция $u_j^0(y)$ — по формуле (17).

Числовой пример. Приведем результаты расчета перекрытия, состоящего из пяти балок главного направления и трех перекрестных балок. Балки обоих направлений жестко защемлены. Параметры балок [5]: двутавр № 30, момент инерции 7080 см^4, момент сопротивления 472 см^3; длина главной балки 4 м, а перекрестной балки — 6 м. Приведенная равномерно распределенная нагрузка на главные балки 100 кН/м. Расчеты выполнялись в системе Maple [6], [7].

Результаты расчета отображены на рис. 2 – 5 в виде эпюр прогибов и максимальных нормальных напряжений в балках перекрытия. Используется система СИ: длина приводится в метрах, напряжение — в паскалях.

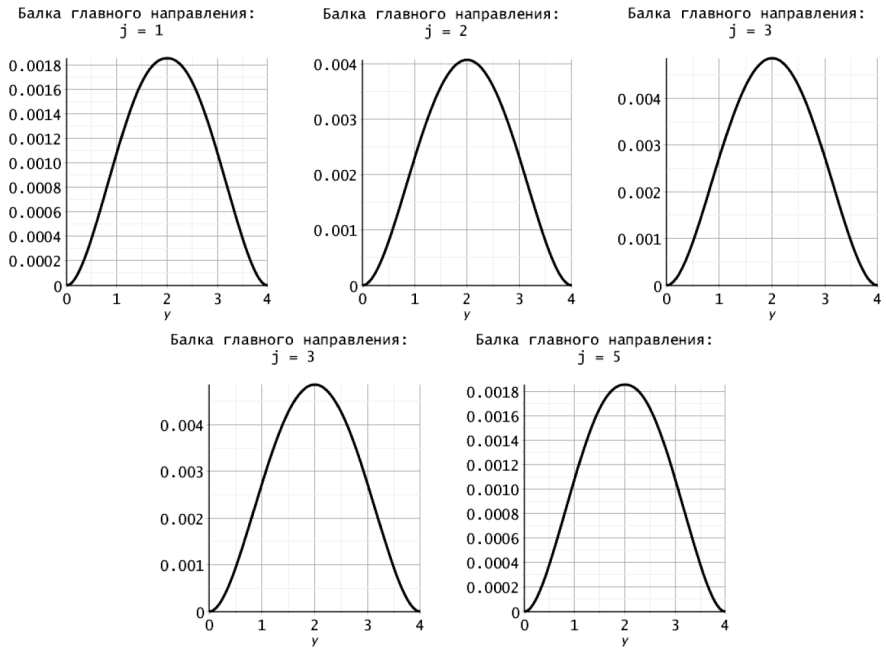


Рис. 2. Эпюры прогибов балок главного направления



Рис. 3. Эпюры прогибов перекрестных балок

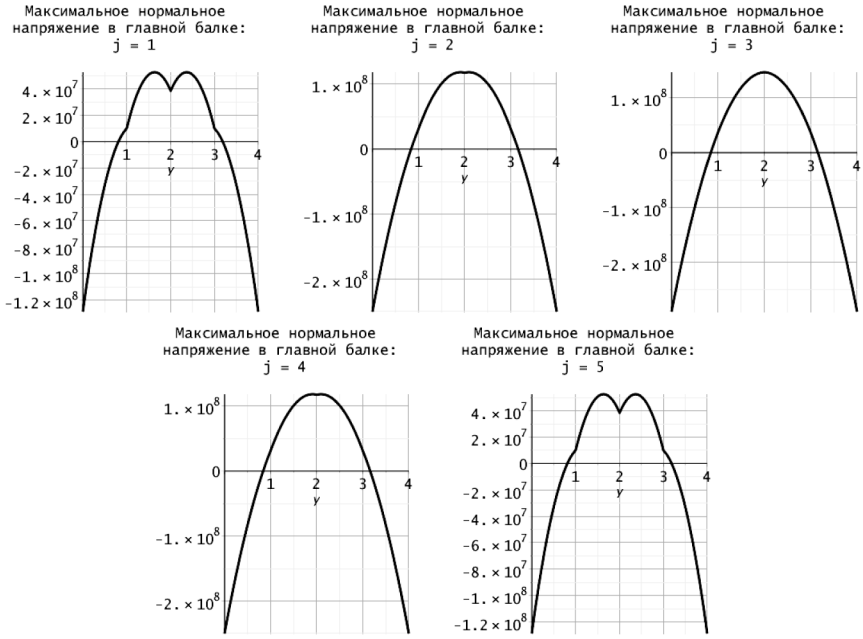


Рис. 4. Эпюры нормальных напряжений в балках главного направления



Рис. 5. Эпюры нормальных напряжений в перекрестных балках

Заключение. Рассмотренный пример показывает эффективность применения метода Навье в совокупности с системой аналитических вычислений Maple к расчету балочных перекрытий различного назначения. Как правило, для расчета таких конструкций в настоящее время используется метод конечных элементов. С развитием вычислительной техники и созданием систем аналитических вычислений, таких как Maple или Mathematica, появилась возможность анализа достаточно сложных задач математической физики аналитическими методами. Расчет балочного перекрытия численно-аналитическим методом рассмотрен, например, в статье [8]. Аналитическими методами стало возможным решать и другие сложные задачи теории упругости [9] – [14].

Список литературы

1. *Постнов В. А.* Строительная механика корабля и теория упругости: в 2 т. / В. А. Постнов, В. П. Суслов. — Л.: Судостроение, 1987. — Т. 1. — 288 с.

2. *Голоскоков Д. П.* Формализация на основе теории ребристых оболочек и численно-аналитические методы моделирования упругих тонкостенных конструкций нерегулярной структуры: дис. ...д-ра техн. наук: 05.13.18 / Д. П. Голоскоков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2001.

3. *Голоскоков Д. П.* Метод полиномов в задачах теории тонких плит / Д. П. Голоскоков, П. Г. Голоскоков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2008.

4. *Голоскоков Д. П.* Численно аналитические методы расчета упругих тонкостенных конструкций нерегулярной структуры. / Д. П. Голоскоков. — СПб.: Изд-во А. Кардакова, 2006.

5. *Александров А. В.* Сопротивление материалов: учебник для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б.П. Державин. — М.: Высш. шк., 2003.

6. *Goloskokov D. P.* Analyzing simply supported plates using Maple system / D. P. Goloskokov // International conference on computer technologies in physical and engineering applications, ICCTPEA 2014, Russia, Saint-Petersburg, June 30 – July 4. — 2014. — Pp. 57–58.

7. *Голоскоков Д. П.* Примеры реализации в Maple энергетического метода для задач изгиба тонких плит / Д. П. Голоскоков // IV-й Международный семинар по математическому моделированию в системах компьютерной математики KAZCAS-2014. Международная школа по математическому моделированию в системах компьютерной математики KAZCAS-SCHOOL-2014; под общ. ред. Ю. Г. Игнатьева. — Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2014. — С. 33–62.

8. *Матросов А. В.* Расчет балочных перекрытий численно-аналитическим методом / А. В. Матросов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 1. — С. 8–15.

9. *Матросов А. В.* Численно-аналитический алгоритм решения задач плоской деформации линейно-упругих тел сложной конфигурации / А. В. Матросов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2008. — № 3. — С. 70.

10. *Матросов А. В.* Алгоритмы получения замкнутых форм операторов метода начальных функций для пространственных задач теории упругости / А. В. Матросов, Г. Н. Ширунов // Вестник гражданских инженеров. — 2014. — № 1 (42). — С. 136–144.

11. *Матросов А. В.* Численно-аналитический расчет балок-стенок на линейно-упругом основании / А. В. Матросов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 2. — С. 14а–21.

12. *Ширунов Г. Н.* Анализ напряженно-деформированного состояния упругого слоя под действием локальной нагрузки методом начальных функций / Г. Н. Ширунов // Вестник гражданских инженеров. — 2014. — № 5 (46). — С. 58–67.

13. *Shirunov G. N.* A method of initial functions in analyzing a stress and strain state of an elastic layer / G. N. Shirunov // 2014 International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA) Editor: E. I. Veremey. — Изд-во СПбГУ; IEEE (IEEE Catalog number CFP14BDA-USB). — 2014. — С. 166–167.

14. *Matrosov A. V.* Numerical-analytical computer modeling of a clamped isotropic thick plate / A. V. Matrosov, G. N. Shirunov // 2014 International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA) Editor: E. I. Veremey. — СПб.: Изд-во СПбГУ; IEEE (IEEE Catalog number CFP14BDA-USB). — 2014. — С. 96.

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

УДК [620.17/.179.1:621.791.05]:669.14.018.293-192

Н. Нгуен,
асп.;

А. Р. Рубан,
канд. техн. наук, доц.

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ ШВОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРПУСНОЙ СТАЛИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

EFFECT OF WELD DEFECTS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE STEEL BODY, DETERMINED UNDER DYNAMIC LOADING

Срок службы корпусных конструкций определяется различными дефектами, в том числе технологическими и приобретенными в процессе эксплуатации. Правилами Российского морского регистра судоходства нормируются требования к допускаемым размерам дефектов сварных швов, превышение которых приводит к дополнительным работам по их устранению как при постройке нового судна, так и при судоремонте. Влияние дефектов сварных швов на срок службы корпусных конструкций, на наш взгляд, недостаточно изучен. В приведенном исследовании влияние дефектов сварных швов на механические свойства корпусной стали изучаться на стандартных образцах для испытаний на маятниковых копрах с определением ударной вязкости при температуре минус 20 °С. Дефекты сварных швов выявлялись рентгенографированием. Оценивалась их площадь, которая корректировалась последующим макроскопическим анализом. Также применялся микроструктурный анализ металла сварного шва, околошовной зоны и зоны термического влияния. Результаты испытаний показывают, что с увеличением площади дефекта ударная вязкость снижается. Для корпусной стали PCD 40 Правилами Российского морского регистра судоходства нормируется минимальное значение ударной вязкости, которое должно быть не ниже 26 Дж/см². Указанная величина ударной вязкости наблюдается при отношении площади дефекта к площади образца 45 % (при площади дефекта 40 мм²). В диапазоне отношений средней площади дефекта к площади сечения образца от 0 до 30 % снижение ударной вязкости незначительно.

Lifetime hull structures is determined by various defects, including technological and acquired during the operation. Rules of the Russian Maritime Register of Shipping standardized requirements for admissible size of defects of welds, exceeding the size of which leads to additional work to eliminate them, as in the construction of a new vessel, and in ship repair. The influence of defects in the welds lifetime hull structures in our opinion is poorly understood. In this study, the influence of defects in the welds on the mechanical properties of the body began to study for standardized test a pendulum with the definition of toughness at –20 °C. Defects in welds identified radiography. Evaluate their area, which was adjusted, followed by macroscopic analysis. Also used microstructural analysis of the weld metal, heat affected zone and heat affected zone. The test results show an increase of the defect toughness decreases. For cabinet steel RSD 40 Rules of the Russian Maritime Register of Shipping normalized minimum value of toughness, which should not be below 26 J/cm². This value toughness observed with respect to the area of the defect area of a sample of 45 % (the defect area of 40 mm²). The relationship between the average area of the defect to a cross-sectional area of the sample is from 0 to 30 %, reduction in toughness slightly.

Ключевые слова: сварное соединение, сварочные дефекты, непровары, поры, шлаковые включения, сварные конструкции, механические испытания, ударная вязкость.

Key words: welded joint, welding defects, lack of penetration, pores, slag inclusions, welded constructions, mechanical testing, toughness.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ корпусных конструкций судов в значительной степени определяется технологическими и эксплуатационными дефектами. Дефекты, приобретенные в процессе эксплуатации корпусов судов, оказывают влияние на остаточную долговечность корпусных конструкций, но предметом представленного исследования не являются. Это исследование посвящено технологическим дефектам сварки и их влиянию на механические свойства

судостроительной стали. В настоящее время технология сварки в судостроении и судоремонте достаточно отработана, однако вероятность появления технологических дефектов все еще высока [1]. К дефектам сварных швов относятся непровары, несплавления, подрезы, поры, шлаковые включения и т.п. Проблема прогнозирования долговечности таких конструкций является актуальной.

Причинами возникновения дефектов могут являться неудовлетворительная свариваемость металла, плохое качество электродов, покрытий и флюсов, неправильные технология и режимы сварки, недостаточная квалификация сварщика и др. [2] – [4].

Влияние дефектов на механические свойства сварных соединений определяется величиной и формой дефектов, частотой их повторения, материалом конструкции, условиями эксплуатации, характером действующих нагрузок и т. п. [5], [6]. Поэтому наличие дефектов в сварных соединениях еще не означает потери их работоспособности [7], [8].

В работе [9] нами было проведено исследование влияния дефектов сварки на механические свойства корпусной стали, определяемые при статическом нагружении. Плоские образцы с расположением сварного шва с дефектами поперек образца имели среднее значение временного сопротивления разрыву при испытаниях, равное 421 МПа, предела текучести 294 МПа, относительного удлинения 16 % с небольшим разбросом этих характеристик как в сторону увеличения, так и уменьшения. Согласно правилам Российского морского регистра судоходства, для стали категории PCD 40, применяемой в исследовании в качестве основной, значение этих характеристик составляет: временное сопротивление разрыву 510 – 660 МПа, предел текучести 390 МПа, относительное удлинение 20 %. Таким образом, начиная с отношения площади дефекта к площади сечения образцов 35 % и более, результаты испытаний следует в расчет не принимать, так как такие дефекты оказывают влияние на механические свойства, определяемые при статическом нагружении. Характеристики пластичности корпусной стали, начиная с относительной площади дефектов 35 %, резко снижаются, переводя статическое разрушение из разряда пластического в хрупкое, что также негативно сказывается на работоспособности сварных швов и корпуса судна в целом. Круглые образцы с дефектами, вырезанные из сварного шва, имели как хрупкое, так и пластическое разрушение с четко выраженной площадкой текучести, причем их механические свойства, определенные при статическом нагружении (как и плоских образцов), имели сравнительно небольшой разброс, но характеристики прочности примерно на 100 МПа были больше, чем у плоских образцов.

Следующим этапом исследования является изучение влияния размеров дефектов на механические свойства, определяемые при динамическом нагружении. Корпус судна во время эксплуатации воспринимает динамические нагрузки, при которых многие металлы и их сплавы проявляют склонность к хрупкому разрушению [10]. Опасность разрушения усиливают концентраторы напряжений, к которым относят дефекты сварки.

Для оценки склонности металла к хрупкому разрушению под влиянием этих факторов проводят динамические испытания на ударный изгиб на маятниковых копрах. По шкале маятникового копра определяют работу K, затраченную на разрушение, и рассчитывают ударную вязкость KC, МДж/м^2, по формуле

$$KC = K / S_0^1,$$

где S_0^1 — площадь поперечного сечения образца в месте надреза.

В соответствии со стандартной методикой испытаний разрушению на копре подвергают образцы с U-образным, V-образным надрезами или с T-образной трещиной усталости в основании надреза. Следует отметить, что ударная вязкость, являясь интегральной характеристикой [11], зависящей от прочности и пластичности одновременно, более резко реагирует на изменения структурного состояния материалов, проявляющихся особенно ярко при пониженных значениях температуры. Поэтому нами были проведены испытания при температуре образцов –20 °С, как и установлено требованиями Правил Российского морского Регистра судоходства для стали категории PCD 40.

Таким образом, было изготовлено 63 образца с *V*-образным надрезом для испытаний на ударную вязкость. Эти образцы вырезались поперек сварного шва из 15 сварных стыковых соединений из стали категории PCD 40. Схема вырезки образцов и сами образцы представлены на рис. 1.

а) б)

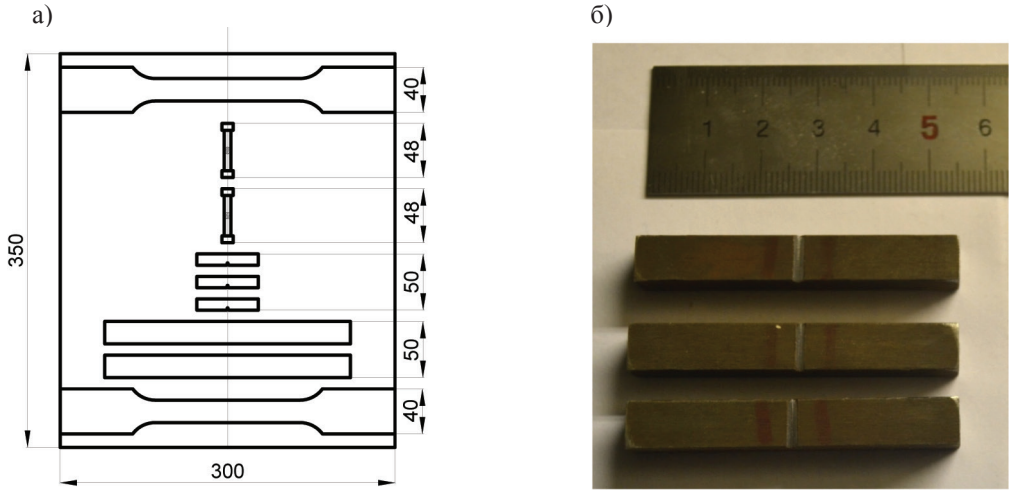


Рис. 1. Образцы для испытаний на ударную вязкость:
схема вырезки (*а*); фотографии образцов (*б*)

В месте надреза у каждого образца радиографическим контролем оценивалась площадь дефекта. Образцы испытывались по ГОСТ 9454-78 в сертифицированной лаборатории по изучению износов и испытаниям материалов с выдачей протокола результатов испытаний на ударный изгиб сварного соединения № 443-505 от 12 мая 2015 г. После испытаний (рис. 2) образцы подвергались макроскопическому анализу для корректировки площади дефекта.

а) б)



Рис. 2. Образцы после испытаний на ударную вязкость:
излом образцов для оценки площади дефектов (*а*); виды изломов образцов (*б*)

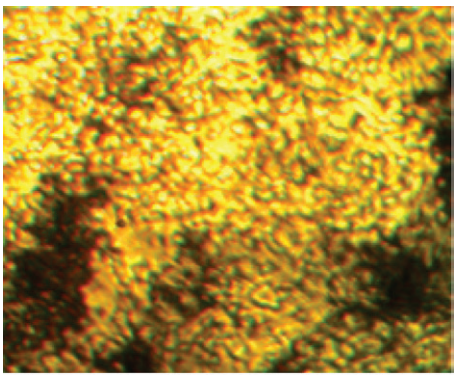


Рис. 3. Микроструктура образцов для испытаний на ударную вязкость (увеличение × 200)

Попутно проводился микроанализ сварного шва, околошовной зоны, зоны термического влияния и основного металла, который показал мелкозернистую ферритно-перлитную структуру, подтверждающую правильную технологию, включая и режимы сварки (рис. 3).

Все экспериментальные данные по результатам испытаний образцов на ударную вязкость были разбиты на пять диапазонов, в которых определялось среднее значение работы удара $KV_T^{-20°C}$, и среднее значение ударной вязкости $KVC^{-20°C}$. Результаты представлены в таблице.

Таблица

Результаты испытаний на ударную вязкость

Номер диапазона	Площадь дефекта A, мм^2	Среднее значение площади дефекта $\overline{A}$, мм^2	Среднее значение работы удара $KV_T^{-20°C}$, Дж	Среднее значение ударной вязкости $KVC^{-20°C}$, Дж/см^2
I	0–17	8,5	87,8	97,7
II	18–35	26,5	84,4	94,4
III	36–53	44,5	23,3	25,9
IV	54–71	62,5	21,6	24,4
V	72–85	80,5	9,0	10,0

По результатам испытаний были построены графики зависимости среднего значения работы удара (рис. 4) и ударной вязкости (рис. 5) от средней площади дефекта.

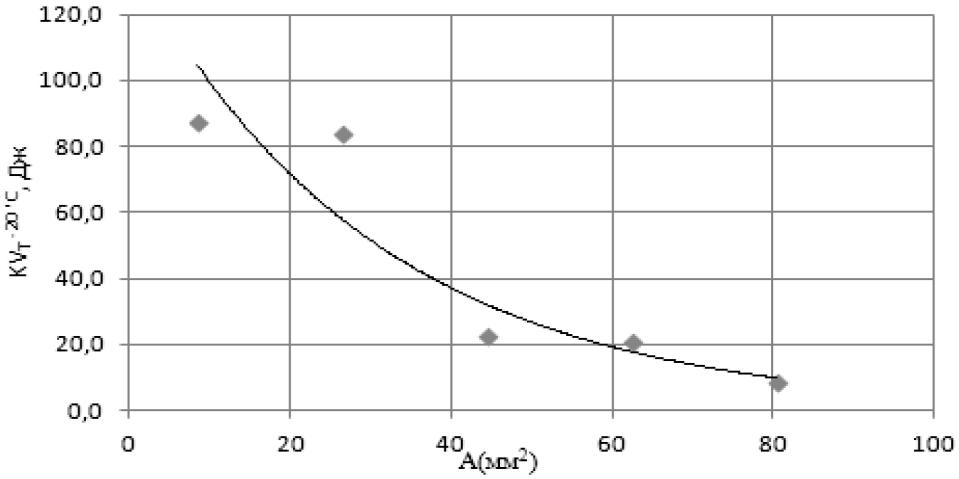


Рис. 4. Зависимость среднего значения работы удара от средней площади дефекта

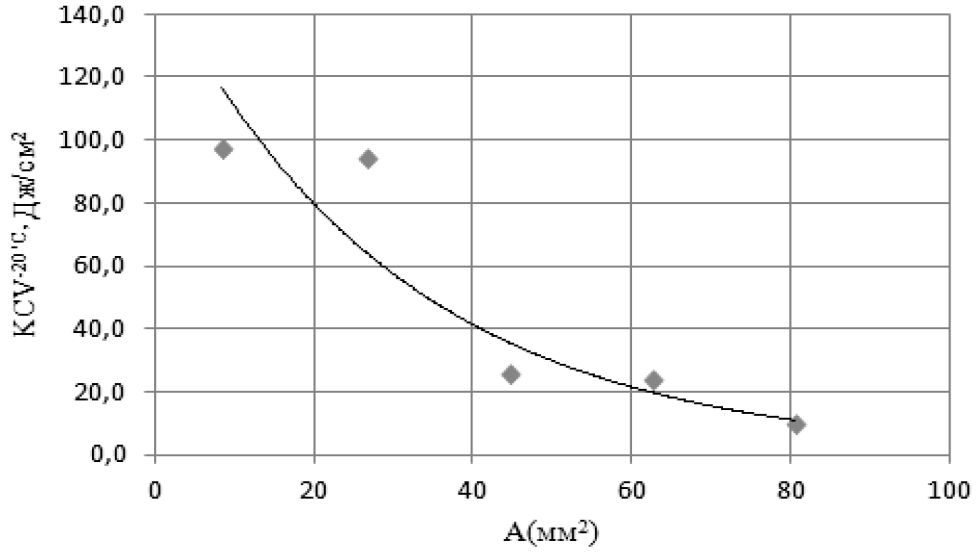


Рис. 5. Зависимость среднего значения ударной вязкости от средней площади дефекта

Результаты испытаний показывают, что с увеличением площади дефекта ударная вязкость снижается. Для корпусной стали PCD 40 Правилами Российского морского регистра судоходства нормируется минимальное значение ударной вязкости, которое должно быть не ниже 26 Дж/см^2. Указанная величина ударной вязкости наблюдается при отношении площади дефекта к площади образца 45 % (при площади дефекта 40 мм^2). В диапазоне отношений средней площади дефекта к площади сечения образца от 0 до 30 % снижение ударной вязкости незначительно.

Таким образом, свойства корпусной стали, определяемые при динамическом нагружении, не снижаются от дефектов сварки (поры, непровары и шлаковые включения), как и свойства, определяемые при статическом нагружении.

Заключительным этапом исследования влияния дефектов сварки на долговечность стальных корпусных конструкций будет изучение этого влияния при циклическом нагружении.

Список литературы

1. *Хоанг М. Ш.* Управление техническим состоянием конструкций корпуса судов в процессе эксплуатации на основе оценки рисков / М. Ш. Хоанг // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2013. — № 1. — С. 71–77.

2. *Судник В. А.* Численный анализ дефектов формы сварного шва при дуговой сварке / В. А. Судник // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2008. — № 2. — С. 177–185.

3. *Лепихин А. М.* Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования / А. М. Лепихин // Вопросы материаловедения. — 2007. — № 3. — С. 208–213.

4. *Иванов В. И.* О нормировании дефектов и достоверности неразрушающего контроля сварных соединений / В. И. Иванов // Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 5. — С. 65–67.

5. *Мясникова А. А.* Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при ручной дуговой сварке / А. А. Мясникова // Master's Journal. — 2012. — № 1. — С. 50–54.

6. *Васин Е. С.* Совершенствование методики расчета прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами на основе результатов испытаний / Е. С. Васин, А. А. Белкин, С. П. Мягков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2012. — № 1. — С. 56–61.

7. *Аборкин А. В.* Исследование и прогнозирование долговечности деталей машин со сварными соединениями: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.02.02 / А. В. Аборкин. — М., 2010.

8. *Гаспарянц Р. С.* Методология расчета на прочность и долговечность труб и сварных соединений с дефектами / Р. С. Гаспарянц // Нефтепромысловое дело. — 2008. — № 2. — С. 35–41.

9. *Нгуен Ньян.* Влияние дефектов сварных швов на механические свойства корпусной стали, определяемые при статическом нагружении / Ньян Нгуен, А. Р. Рубан // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 2. — С. 13–21.

10. *Розенштейн И. М.* Хрупкое разрушение стальных сварных конструкций / И. М. Розенштейн // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2008. — Т. 74. — № 7. — С. 48–51.

11. *Головин С. В.* Обоснование прочности и ударной вязкости сварных соединений магистральных трубопроводов из высокопрочных сталей / С. В. Головин, Н. Г. Блехерова, А. П. Ладыжанский, А. С. Зандберг // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. — 2008. — № 2. — С. 42–47.

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

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.436

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

OUTLOOK OF IMPROVING OF SHIP DIESEL ENGINE'S COOLING SYSTEM

Статья посвящена перспективным направлениям модернизации систем охлаждения дизельных двигателей, входящих в состав судовых энергетических установок. Необходимость предлагаемых модернизаций обусловлена ростом тепловых нагрузок на детали цилиндропоршневой группы, вызванной форсированием двигателей, повышением ресурсных и экологических требований, предъявляемым к судовым энергетическим установкам. В статье предложены и обоснованы такие направления модернизации систем охлаждения, как переход на высокотемпературное охлаждение, регулирование свойств охлаждающей жидкости, совершенствование автоматического регулирования параметров охлаждения, связанное с управлением параметрами систем охлаждения и газотурбинного наддува. Определена совокупность мероприятий, необходимых для проведения модернизации. Представлены перспективные схемы систем охлаждения судовых дизельных двигателей, описаны принципы их действия, предложены конструкции основных элементов модернизированных систем. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований и эксплуатационных испытаний подтверждают, что модернизация систем охлаждения двигателей по предложенным направлениям позволят повысить экономичность, надежность и экологическую безопасность судовых энергетических установок.

The article is devoted to main directions of modernization of cooling system of ship diesel engines. The necessity of this modernization is conditioned by increase of heat loading on parts of cylinder-piston group in consequence of forcing of diesel engines and growth of reliability and ecological requirement for ship's power plant. In the article such directions of modernization as high temperature cooling, improving of automatic regulation of cooling parameters, connected control of cooling and supercharging parameters and correction of cooling liquid's properties are offered and argued. Totality of action, which is necessary for modernization is determined. In the article schemes of perspective cooling systems for ship diesel engines and design of it's elements were presented. The principles of function for these systems are described. Results of theoretical and experimental investigations and exploitation test confirms that modernization of cooling system of ship diesel engines on offered directions will provide increase of economical, reliability and ecological indexes of ship's power plant.

Ключевые слова: судовой дизель, система охлаждения, высокотемпературное охлаждение, наддув, охлаждающая жидкость, автоматическое регулирование.

Key words: ship diesel engines, cooling system, high temperature cooling, supercharging, cooling liquid, properties, automatic regulation.

ОСНОВНЫМИ тенденциями развития судовых энергетических установок (СЭУ) различного назначения, основу которых составляют дизельные двигатели, являются повышение топливной экономичности и надежности при удовлетворении экологических требований, устанавливаемых нормативами IMO.

Повышение экономичности СЭУ обеспечивается, главным образом, за счет снижения удельного эффективного расхода топлива главных и вспомогательных двигателей путем повышения давления наддува p_k (до 0,6 МПа) и среднего эффективного давления рабочего цикла p_e двигателей (до 3,0 МПа) [1], что приводит к повышению тепловых и механических нагрузок на детали и узлы двигателя. Обеспечение надежной работы двигателя возможно лишь при условии поддержания безопасного, с точки зрения механических свойств конструкционных

материалов и смазывающих свойств моторного масла, температурного уровня деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Температурное состояние деталей ЦПГ дизеля оказывает существенное влияние на характер протекания рабочего цикла, а, следовательно, и на индикаторные и эффективные показатели, на экономичность работы двигателя. Температурное состояние деталей ЦПГ определяется функционированием системы охлаждения (СО) двигателя и степенью ее совершенства.

Модернизация СО является обязательным условием форсирования главных и вспомогательных судовых дизелей. Системы охлаждения современных и перспективных судовых дизелей должны обеспечивать оптимальное и стабильное тепловое состояние деталей и узлов. 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. В судовых дизелях за редким исключением применяются жидкостные СО, обеспечивающие теплоотвод требуемой интенсивности и обладающие возможностью гибкого регулирования теплового состояния ДВС. Исследования процессов переноса теплоты от рабочего тела в цилиндре двигателя к охлаждающей жидкости в системе охлаждения [2], [3] показали, что эффективные показатели двигателя могут быть повышены за счет сокращения тепловых потерь при переходе на высокотемпературное охлаждение (ВТО).

Переход на ВТО обеспечивает наиболее благоприятные условия для протекания рабочего цикла дизеля и улучшения его индикаторных показателей на частичных нагрузках за счет повышения температуры стенок камеры сгорания и сокращения периода задержки воспламенения; повышение механического КПД дизеля во всем диапазоне нагрузок за счет уменьшения вязкости масла на зеркале цилиндра; перераспределение составляющих теплового баланса ДВС в направлении роста доли теплоты, превращаемой в механическую работу, и величины потерь теплоты с отработавшими газами с одновременным уменьшением относительных отвода теплоты в охлаждающую жидкость, что расширяет возможности утилизации энергии в системе газотурбинного наддува и дает возможность уменьшить массу и габариты теплообменных аппаратов систем смазки и охлаждения двигателя; стабилизацию температурных полей деталей ЦПГ, что, несмотря на повышение их средней температуры, приводит к снижению термических напряжений в деталях ЦПГ.

При этом следует учитывать, что переход на ВТО предъявляет повышенные требования к качеству регулирования теплового состояния двигателя, так как нарушение требуемых режимов охлаждения неизбежно приводит к перегреву двигателя и резкому снижению ресурсных и экономических показателей. Двигатель внутреннего сгорания как объект регулирования по тепловому состоянию необходимо рассматривать как многофакторный, многопараметрический, динамический, стохастический объект, управление которым требует новых подходов и методов, примеры которых представлены в работах [4], [5].

Процессы теплоотвода в жидкостных СО сопровождаются кавитационно-коррозионными разрушениями элементов систем и образованием отложений на охлаждаемых поверхностях. С повышением уровня форсированности двигателя и ростом тепловых и механических нагрузок интенсивность указанных процессов возрастает. Эти процессы крайне негативно сказываются на надежности и эффективности ДВС. Для предотвращения нарушения режимов охлаждения необходимо совершенствовать эксплуатационные свойства охлаждающих жидкостей и обеспечивать их требуемое качество в процессе эксплуатации.

Перспективы совершенствования жидкостных СО судовых дизелей связаны с решением взаимосвязанных задач, таких как:

1) определение параметров охлаждения, оказывающих наиболее существенное влияние на надежность и эффективность работы двигателя;

2) обоснованный выбор параметров охлаждения для различных скоростных и нагрузочных режимов двигателя;

3) совершенствование систем автоматического регулирования теплового состояния ДВС, и связанного управления параметрами систем охлаждения и наддува;

4) разработка устройств, обеспечивающих автоматический контроль и регулирование параметров охлаждения и наддува.

В работе [6] показано, что функционирование жидкостных СО ДВС характеризуется двумя группами параметров: режимными и водно-химическими.

К первой группе относятся температура охлаждающей жидкости $T_{ож}$, перепад температур в контуре охлаждения ΔT, определяющий плотность теплового потока $q_{охл}$ через охлаждаемые поверхности и количество отводимой через систему охлаждения теплоты $Q_{охл}$. Перспективными для судовых ДВС являются высокотемпературные системы охлаждения (ВТО), в которых температура охлаждающей жидкости превышает 100 ºС. Исследования влияния ВТО на показатели рабочего цикла дизеля [7] показали, что при незначительном снижении индикаторного КПД за счет роста механического КПД имеет место повышение эффективного КПД и перераспределение тепловых потоков: увеличиваются потери с отработавшими газами и уменьшается доля потерь с охлаждающей жидкостью.

Переход на высокотемпературное охлаждение возможен за счет повышения давления во внутреннем контуре СО, в этом случае может быть реализован принцип поддержания постоянства заданного статического давления путем воздействия на охлаждающую жидкость с помощью сжатого воздуха. Схема такой системы представлена на рис. 1 [8]. При запуске двигателя и в период его прогрева температурный уровень обеспечивается термостатом *8*. После прогрева двигателя и его работы на режимах, близких к максимальной мощности, температура охлаждающей жидкости приближается к температуре кипения, о чем на блок *12* управления поступает сигнал от датчика *14*. При появлении в полостях охлаждения пристеночного пузырькового кипения на блок управления *12* от оптического датчика *16* поступает сигнал о наличии паровой фазы. На основании полученной информации блок управления вырабатывает управляющий сигнал, подаваемый на клапан *11*, через который сжатый воздух от компрессора *10* поступает в герметичный расширительный бак *8*, что обеспечивает повышение давления в системе охлаждения и исключает возможность перехода пузырькового кипения в пленочное.

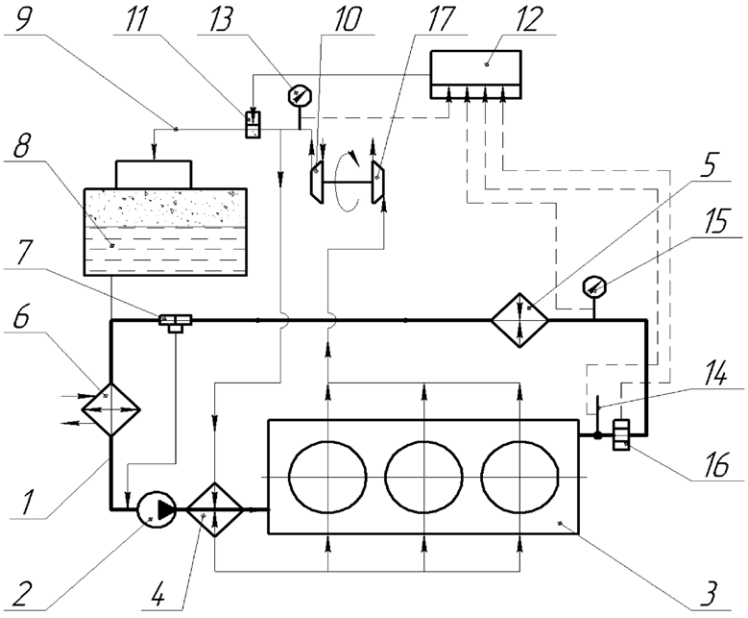


Рис. 1. Схема системы охлаждения с регулированием давления во внутреннем контуре:
1 — внутренний контур СО; *2* — циркуляционный насос;
3 — рубашка охлаждения поршневой части; *4* — охладитель наддувочного воздуха;
5 — водомасляный охладитель; *6* — водо-водяной охладитель;
7 — термостат; *8* — расширительный бак; *9* — воздушная магистраль; *10* — компрессор;
11 — редукционный клапан; *12* — блок управления; *13* — датчик давления наддува;
14 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе двигателя;
15 — датчик давления в системе охлаждения;
16 — оптический датчик присутствия в охлаждающей жидкости паровой фазы; *17* — турбина

Проблеме определения параметров охлаждения, обеспечивающих наилучшие экономические, экологические и ресурсные показатели работы двигателя на различных режимах, посвящена работа [9].

Связанное управление температурой охлаждающей жидкости, давлением и температурой наддувочного воздуха с целью обеспечения наилучших экономических и экологических показателей работы двигателя актуально для современных и перспективных высокофорсированных дизелей и предусматривается современной концепцией охлаждения ДВС [10]. Перспективность совершенствования систем автоматического регулирования температуры наддувочного воздуха в зависимости от режима работы двигателя подтверждается исследованиями, представленными в работах [11], [12].

Для реализации такого подхода предложена [13] модернизированная система газотурбинного наддува, представленная на рис. 2. Основу системы составляет электронный блок управления. В его память занесены значения предпочтительных параметров наддува в виде функциональной зависимости от режима работы двигателя, определяемого частотой вращения и цикловой подачей. Таким образом, значения предпочтительных параметров наддува для произвольного режима рассчитывается программно.

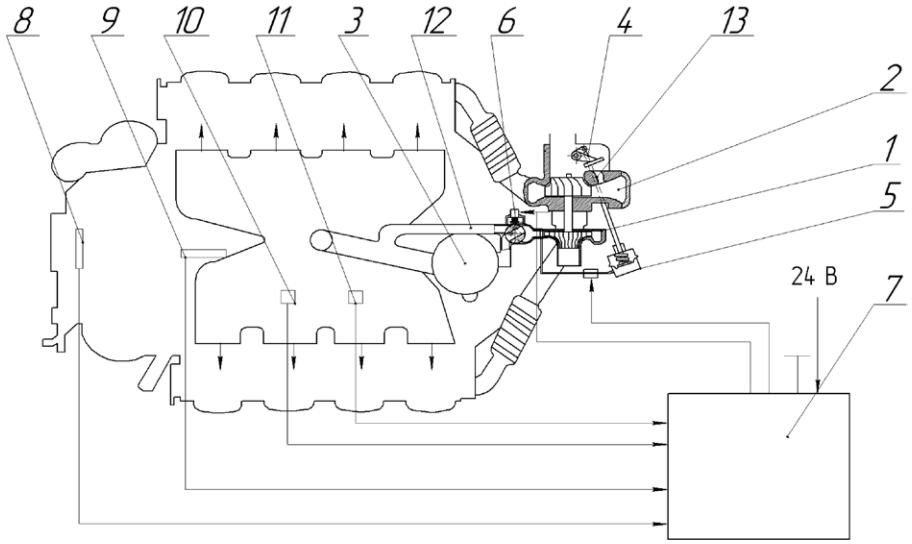


Рис. 2. Схема управления параметрами наддува:
1 — компрессор; *2* — турбина; *3* — охладитель наддувочного воздуха;
4 — заслонка перепускного клапана; *5* — пневмоэлемент управляющий заслонкой;
6 — клапан перепуска наддувочного воздуха мимо ОНВ;
7 — электронный блок управления; *8* — датчик частоты вращения;
9 — датчик положения рейки топливоподачи;
10 — датчик давления наддувочного воздуха на впуске в двигатель;
11 — датчик температуры наддувочного воздуха на впуске в двигатель;
12 — байпасный канал наддувочного воздуха; *13* — канал перепуска отработавших газов

Система работает следующим образом. Перед пуском двигателя заслонка *4* перепускного канала *13* под действием возвратной пружины управляющего пневмоэлемента находится в закрытом положении, когда все отработавшие газы направляются на рабочее колесо турбины. Клапан перепуска наддувочного воздуха *6* под действием возвратной пружины находится в положении, когда весь наддувочный воздух направляется в охладитель наддувочного воздуха *3*. После запуска двигателя на электронный блок управления начинают поступать сигналы с датчиков режима работа двигателя. К ним относятся индуктивный датчик частоты вращения *8* и датчик положения рейки топливного насоса *9*, определяющий цикловую подачу топлива. На основе их сигналов электронный блок рассчитывает предпочтительные значения параметров наддувочного воздуха для данного режима работы.

Помимо данных о режиме работы, на электронный блок управления поступают аналоговые сигналы о фактическом значении температуры и давления наддувочного воздуха на входе в цилиндр (датчики *10*, *11*), где они преобразуются в цифровые значения. Полученные значения сравниваются с расчётными, и в случае отличия выполняется регулирующее воздействие на исполнительные органы. Их функции выполняют перепускной клапан отработавших газов и перепускной клапан наддувочного воздуха. Перепускной клапан отработавших газов (рис. 3) перепускает часть отработавших газов в обход рабочего колеса. Он состоит из заслонки *4*, выполняющей непосредственно функцию клапана, и пневмоэлемента *2*, управляющего посредством тяги её работой. При поступлении наддувочного воздуха под определённым давлением в надмембранную полость пневмоэлемента *2* эластичная мембрана *7*, соединённая с тягой *8*, преодолевая усилие пружины *9*, перемещается, поворачивая заслонку и открывая перепускной канал *3*.

Для устранения зависимости момента открытия заслонки от величины давления наддува в канал подвода наддувочного воздуха к надмембранному пространству устанавливается электромагнитный клапан. Таким образом, регулирование давления наддува осуществляется управляющим сигналом электронного блока управления. Необходимо отметить, что при данной системе регулирования компрессор должен быть несколько большей производительности по сравнению с нерегулируемым турбокомпрессором для гарантированного обеспечения заданных давлений наддува.

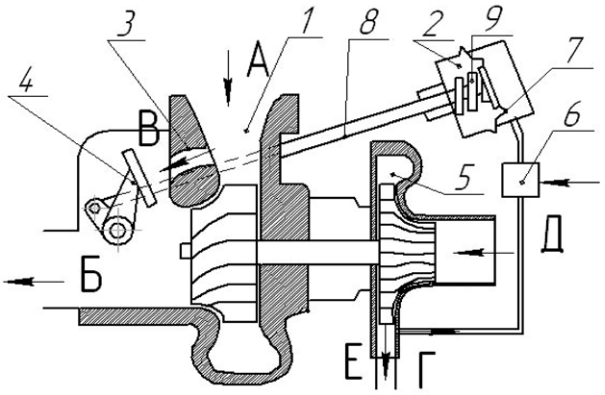


Рис. 3. Перепускной клапан отработавших газов:
А — подвод ОГ к турбине; *Б* — отвод ОГ от турбины;
В — перепуск ОГ; *Г* — подвод управляющего давления наддува;
Е — подач воздуха под давлением; *Д* — подвод воздуха к компрессору;
1 — сопловой аппарат турбины; *2* — управляющий пневмоэлемент;
3 — перепускной канал; *4* — заслонка; *5* — улитка компрессора; *6* — электромагнитный клапан;
7 — эластичная мембрана; *8* — тяга; *9* — пружина

Основной характеристикой водно-химического режима, определяющей интенсивность кавитационно-коррозионных разрушений, является водородный показатель pH охлаждающей жидкости. Наиболее эффективным способом регулирования водородного показателя охлаждающих жидкостей ДВС является введение присадок в систему охлаждения. Перспективным направлением модернизации является автоматическое обеспечение требуемых свойств охлаждающей жидкости за счет коррекции концентрации содержащихся в ней присадок (рис. 4) [14].

Охлаждающая жидкость отводится от рубашки *5* охлаждения поршневой части двигателя по трубопроводу *19*. Термостат *8* направляет жидкость либо на всасывание циркуляционного насоса 4 (при непрогретом двигателе), либо в водо-водяной охладитель *3* (при прогретом двигателе).

Охлаждающая жидкость, подаваемая циркуляционным насосом *4*, проходит через охладитель *6* наддувочного воздуха и водомасляный охладитель *7*, затем по трубопроводу *1* возвращается в рубашку *5* охлаждения поршневой части. Всасывающая магистраль *10* насоса *4* соединена с расширительным баком *9*, к которому присоединена емкость *11*, заполненная концентратом присадки. Подача

присадки в контур *1* охлаждения осуществляется через игольчатый клапан *12*, который открывается и закрывается по сигналу, поступающему от блока *13* управления. Управляющее воздействие вырабатывается блоком управления на основании информации, получаемой от анализатора *18* химических свойств теплоносителя, и перепада давлений на входе в двигатель и выходе из него, определяемого датчиками *15* и *17*, при этом учитывается температура охлаждающей жидкости на входе в двигатель и выходе из него, определяемая датчиками *14* и *16*. В анализаторе *18* химических свойств определяются такие свойства жидкости, характеризующие ее химическую агрессивность и склонность к накипеобразованию, как водородный показатель, жесткость, кислородо- и солесодержание.

Перепад давления в рубашке охлаждения позволяет оценить степень деструкции макромолекул водорастворимых полимеров и мицеллярных образований поверхностно-активных веществ, входящих в состав присадок. Управляющее воздействие на дозирующий игольчатый клапан *12* вырабатывается в результате сравнения информации, поступившей в блок *13* управления от датчиков, и заложенных в его память требуемых значений показателей качества охлаждающей жидкости. В качестве анализатора химических свойств охлаждающей жидкости можно использовать приборы «Мультитест ИПЛ-513» или «Мультитест КСЛ-101», позволяющие определять водородный показатель (pH) жидкости, жесткость, общее солесодержание

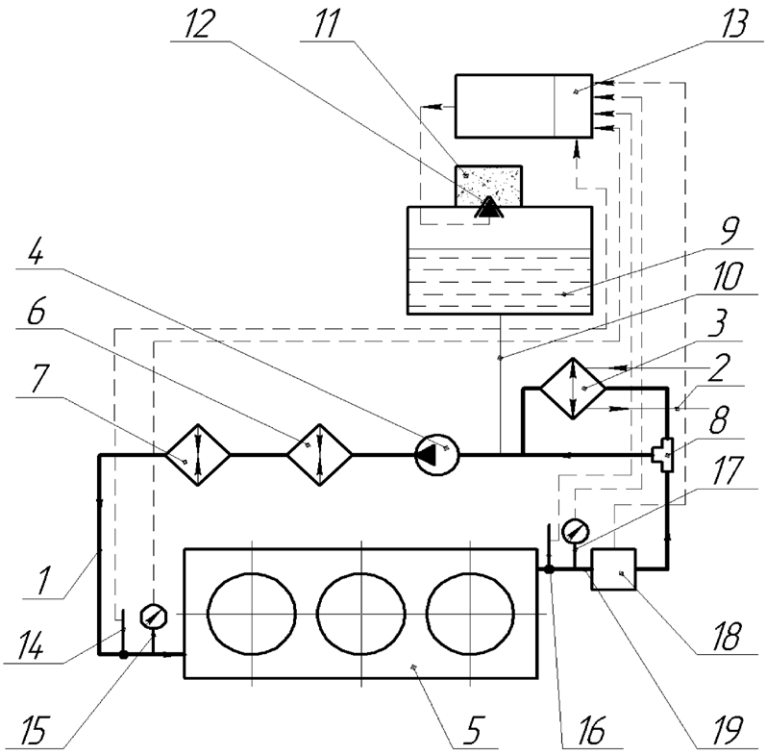


Рис. 4. Система охлаждения с автоматической коррекцией свойств охлаждающей жидкости
1 — замкнутый контур; *2* — разомкнутый контур; *3* — водо-водяной охладитель;
4 — циркуляционный насос; *5* — рубашка охлаждения; *6* — охладитель надувочного воздуха;
7 — водомасляный охладитель; *8* — термостат; *9* — расширительный бак;
10 — всасывающая магистраль насоса; *11* — емкость с концентратом присадки; *12* — игольчатый клапан;
13 — блок управления; *14*, *16* — датчики температуры; *15*, *17* — датчики давления;
18 — анализатор химических свойств охлаждающей жидкости; *19* — отводящий трубопровод

Таким образом, в предлагаемой системе охлаждения обеспечивается непрерывный и оперативный контроль качества охлаждающей жидкости и, при необходимости, автоматическое восстановление ее эксплуатационных свойств. По сравнению с существующими системами охлаждения предлагаемая система облегчает обслуживание двигателей внутреннего сгорания и повышает их надежность.

В качестве блока управления в предложенных системах можно использовать программируемый микропроцессор, например ATMega8 или PIC16F1823, что позволит регулировать давление в системе охлаждения в зависимости от режима работы двигателя по заложенной в блок управления программе и поступление присадки в систему охлаждения в зависимости от физико-химических свойств охлаждающей жидкости.

Расчетные, лабораторные и стендовые исследования, а также эксплуатационные испытания показали, что предлагаемые технические решения позволяют за счет модернизации системы охлаждения и совершенствования автоматического регулирования параметров охлаждения и наддува обеспечить повышение надежности и экономичности судовых дизелей. Дальнейшие исследования целесообразно посвятить разработке алгоритмов управления для программируемых микропроцессоров.

Список литературы

1. *Конкс Г. А.* Мировое судовое двигателестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — М.: Машиностроение, 2005.

2. *Жуков В. А.* Перспективы высокотемпературного охлаждения транспортных ДВС / В. А. Жуков // Автомобильная промышленность. — 2011. — № 5. — С. 7–10.

3. *Разуваев А. В.* Повышение эффективности энергетических установок / А. В. Разуваев, Е. А. Соколова, Е. А. Разуваева // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 3. — № 1. — С. 150–159.

4. *Денисов В. П.* Управление системой охлаждения двигателей внутреннего сгорания на основе нечеткого логического вывода / В. П. Денисов, И. И. Матяш, О. О. Мироничева // Вестник СибАДИ. — 2012. — Т. 3. — № 25. — С. 11–17.

5. *Дорохов П. А.* Теоретическое исследование теплопереноса и распределения теплоты в судовом двигателе внутреннего сгорания / П. А. Дорохов, А. Ф. Дорохов // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 1. — С. 101–104.

6. *Безюков О. К.* Комплексный подход к выбору конструкции и параметров систем охлаждения транспортных ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. А. Тарасов // Вестник двигателестроения. — 2003. — № 2. — С. 70–73.

7. *Безюков О. К.* Совершенствование системы жидкостного охлаждения транспортных ДВС. Двигатели внутреннего сгорания / О. К. Безюков, В. А. Жуков, Е. Н. Николенко // Всеукраинский науч.-техн. журнал. — 2013. — № 1. — С. 56–61.

8. 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.

9. *Безюков О. К.* Комплексная оптимизация параметров охлаждения судовых энергетических установок / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1 (13). — С. 51–60.

10. *Безюков О. К.* Современная концепция регулирования охлаждения судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 93–103.

11. *Жуков В. А.* Модернизация системы газотурбинного наддува конвертированного дизеля / В. А. Жуков, М. С. Курин // Вестник машиностроения. — 2007. — № 3. — С. 17–19.

12. *Мошенцев Ю. Л.* Возможности регулирования температур теплоносителей в альтернативной системе охлаждения дизельных двигателей магистральных тепловозов / Ю. Л. Мошенцев, А. А. Гогоренко, Д. С. Минчев [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. — 2012. — № 10. — С. 92–97.

13. Пат. 2472950 РФ, МПК F02B 37/16 F02B 37/18 F02/B 37/22 F02D 23/00. Система турбонаддува двигателя внутреннего сгорания / В. А. Жуков, М. С. Курин. — Опубл. 20.01.2013. — Бюл. № 2. — 7 с.

14. Патент 2453714 РФ, МПК F01P 5/10. Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / Жуков В. А. — Опубл. 20.06.2012. — Бюл. № 17. — 7 с.

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

УДК 621.43.004.12

И. А. Боровикова,
канд. техн. наук, доц.

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ КАЧЕСТВА СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

EVALUATION OF THE TECHNICAL LEVEL OF QUALITY MARINE ENGINE

В статье приводится оценка уровня качества отечественного и зарубежного двигателя, определяется перечень и значение единичных показателей качества, которые сопоставляются с базовыми значениями. В статье оценивается технический уровень двигателя и выполняется сопоставление по его единичным показателям качества, которые характеризуют техническое совершенство двигателя.

Тема актуальна, однако кроме рассмотренных вариантов целесообразно было бы рассмотреть взаимозаменяемый вариант оценки серийного двигателя, выпускаемого промышленностью, в качестве базовых принять среднестатистические показатели большого числа современных дизелей. Они позволяют оценить уровень нового двигателя с точки зрения мирового судостроения и сделать вывод о целесообразности дальнейшего его выпуска. При проектировании новых двигателей базовые значения, выбираемые для сравнения, должны определяться прогнозированием развития дизеля данного класса на несколько лет вперед. В статье для сравнительной оценки используется обобщенный показатель качества (интегральный и комплексный). В отечественной практике применяется одновременное сопоставление двигателя с перспективным образцом и показателями двигателей, установленными Государственным стандартом. Оценка технического уровня дизелей производилась с помощью приведенной номенклатуры показателей.

The paper presents an evaluation of the quality level of domestic and foreign motor, determines the list and the value of individual quality indicators, which are compared with the baseline values. The paper evaluated the technical level of the engine, where the comparison is performed only on the single indicators of quality that characterize the technical excellence of the engine. Topic is relevant, however, in addition to the options considered it would be appropriate to consider the evaluation version of interchangeable production engine, commercially available as a base to take the average performance of a large number of modern diesel engines. They allow you to assess the level of the new engine in terms of the global shipbuilding and conclude the feasibility of further release it. Obviously the design of new engines baseline values selected for comparison must be determined for forecasting the development of the diesel class for several years ahead. In an article for the comparative evaluation using a generalized indicator of quality (integral and complex). In domestic practice, a simultaneous comparison of the engine with a promising model and engine parameters established by government standards. Evaluation of the technical level diesels made using the above nomenclature indicators.

Ключевые слова: технический уровень качества дизеля, классификационный показатель, коэффициент весомости, метод экспертных оценок.

Key words: technical quality of the engine, classification index, weighting factor, the method of expert estimates.

ПЕРЕХОД промышленности на производство высокофорсированных дизелей, отличающихся значительным усложнением систем и высоким уровнем тепловой и механической напряженности основных деталей, а также жесткие требования рынка к их качеству, темпам его улучшения, обеспечению надежности и эффективности их эксплуатации ставят в число наиболее актуальных задач проблему управления качеством принимаемых решений на всех этапах их жизненного цикла. Сложность конструкции судового двигателя, большое количество узлов и агрегатов, подлежащих контролю, приводит к тому, что в настоящее время расходы на поддержание технической готовности судового двигателя в пять – десять раз превосходят затраты на его производство и, несмотря на внедрение новых технологий в производстве, в условиях эксплуатации решение проблемы обеспечения их качества еще далеко от совершенства. В распоряжении специалистов уже имеются отдельные алгоритмы оценки качества судовых дизелей на различных этапах их жизненного цикла, однако комплексно рассматриваемая проблема в специальной литературе до настоящего времени не нашла широкого отражения.

Решение проблемы требует разработки совокупности косвенных показателей, значение которых определяет техническое совершенство двигателя, требует создания специальных методик, базирующихся на теории подобия, статистических, математических и физических моделях и позволяющих прогнозировать конструктивные и эксплуатационные характеристики дизельной энергетической установки судна на всех этапах жизненного цикла дизеля. Разработка такого обобщающего подхода к оценке качества судовых дизелей, от выбора исходных данных при проектировании до выбора наиболее рациональных технологий их технического обслуживания и ремонта, представлена в работах [1] – [10]. В настоящей статье обобщены имеющиеся наработки и предложен объективный подход к оценке технического уровня качества судового двигателя.

В проблемно-ориентированной научной литературе [2] – [5] для решения подобного рода задач рассматривают различные наборы показателей качества, рекомендуя при этом для сравнительных исследований использовать комплексный показатель качества продукции, вычисленный методом среднего взвешенного:

$$\Pi_0 = \sum_{j=1}^{z} m_j g_j, \tag{1}$$

где m_j — коэффициент весомости показателя g_j; g_j — показатель j-го свойства оцениваемого двигателя; Z — число учитываемых свойств.

Коэффициент весомости показателя качества при таком подходе оценивает значимость данного показателя среди остальных. Значения определяются методом экспертных оценок или на основе анализа влияния данного показателя качества на технико-экономическую эффективность двигателя. При этом

$$\sum_{j=1}^{z} m_j = 1, \tag{2}$$

где m — количество оценочных показателей.

При рассматриваемом подходе к оценке качества серийного двигателя, выпускаемого промышленностью, в качестве базовых обычно принимаются среднестатистические показатели большого числа современных дизелей. Они позволяют оценить уровень нового дизеля с точки зрения мирового дизелестроения и сделать вывод о целесообразности дальнейшего его выпуска. Очевидно, что при проектировании нового дизеля базовые значения, выбираемые для сравнения, должны определяться прогнозированием развития дизелей данного класса на 8 – 12 лет вперед.

В отечественной практике [2], [5], [11] применяется одновременное сопоставление дизелей с перспективным образцом и показателями двигателей, установленными государственным стандартом.

При оценке уровня качества двигателя определяются относительные единичные показатели качества:

$$g_j = \Pi_j / \Pi_{j\text{б}} \tag{3}$$

или

$$g_j = \Pi_{j\text{б}} / \Pi_j, \tag{4}$$

где Π_j — единичный показатель j-го свойства; $\Pi_{j\text{б}}$ — то же базовое значение.

Для показателей Π_j, снижающихся при повышении уровня качества (например, удельного расхода топлива), используется формула (3). Если с улучшением качества показатель растет (например, ресурс до первой переработки), то используется формула (4) [1], [4], [5], [11] – [14].

Таким образом, если $g_j > 1$, то j-е свойство дизеля изменилось в лучшую сторону по сравнению с базовым.

Когда при оценке уровня качества или технического уровня дизеля важно значение каждого показателя g_j, уровень считается ниже базового, если хотя бы один из относительных единичных показателей качества окажется меньше единицы [4], [15]. В остальных случаях при оценке

используется обобщенный показатель [1], [12]. Последний может быть выражен главным относительным единичным показателем качества (например, отношением удельных расходов топлива), интегральным и комплексным показателем качества [3], [4], [12].

В качестве примера использования описанной методики рассмотрим процедуру государственной аттестации, при которой оценка технического уровня дизелей производится с помощью приведенной номенклатуры показателей [5], [11], [16], [17] (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Оценка технического уровня дизеля по показателям качества

Показатель качества	Коэффициент весомости
Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	0,267
Удельный расход масла на угар, г/(кВт·ч)	0,267
Ресурс до первой переработки, тыс. ч	0,201
Ресурс до капитального ремонта, тыс. ч	0,134
Удельная материалоемкость, кг/(кВт·ч)	0,083
Удельная энергонасыщенность, кг/(кВт·ч)	0,148

Таблица 2

Оценка технического уровня дизелей по классификационным показателям

Наименование отдельных показателей качества	Дизель		g_j
	6ЧНСП 18/22	6НС11 16/16,5	
Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	211	211	1,0
Удельный расход масла на угар, г/(кВт·ч)	1,36	1,63	1,2
Ресурс до первой переработки, тыс. ч	12,0	10,0	1,2
Ресурс до капитального ремонта, тыс. ч	45,0	40,0	1,125
Удельная материалоемкость, кг/(кВт·ч)	$0{,}58 \cdot 10^{-3}$	$0{,}38 \cdot 10^{-3}$	0,66
Удельная энергонасыщенность, кг/(кВт·ч)	1720	596	0,66

Приведем в качестве примера оценку технического уровня дизеля 6ЧНСП 18/22 (P_e = 165 кВт, n = 750 об/мин), сопоставив его с зарубежным дизелем 6ЧНС11 16/16,5 (P_e = 185 кВт, n = 1000 об/мин), имеющим близкие классификационные показатели (P_e, n, s, d).

Как видно из таблиц, сравниваемый дизель по трем показателям лучше аналога, по двум хуже. По удельному расходу топлива двигатели равноценны. В соответствии с выражением (1) для дизеля 6ЧНСП 18/22

$$\Pi_0 = 0{,}267 \cdot 1 + 0{,}267 \cdot 1{,}2 + 0{,}201 \cdot 1{,}2 + 0{,}234 \cdot 1{,}125 + 0{,}83 \cdot 0{,}66 + 0{,}048 \cdot 0{,}663 \approx 1{,}066. \quad (5)$$

Вместе с тем, в рассмотренном подходе основное внимание уделяется признакам, характеризующим конструкцию дизеля, не уделяя должного внимания признакам, характеризующим требования потребителя, производственные и кадровые возможности предприятия-изготовителя, предприятия, осуществляющего сервисное и техническое обслуживание, а также судоремонтного предприятия. Поэтому, хотя рассмотренная методика оценки технического уровня качества судового двигателя обладает по сравнению с другими существующими методиками рядом преимуществ: простотой использования и компактностью, независимостью от режима работы двигателя, возможностью применения для различных типов двигателя), отмеченные недостатки потребовали рассмотрения и других подходов.

С целью решения упомянутых задач рядом авторов предпринята попытка при сопоставлении множества взаимозаменяемых вариантов расширить перечень оценочных показателей, характеризующих то или иное свойство изделия. При этом показатели формулируются так, чтобы с их

улучшением улучшался и общий технико-экономический уровень решения. Примеры оценочных классификационных показателей: надежность, бесшумность, долговечность, ремонтопригодность и др. [1], [12].

Для каждого большого показателя разбивается большая шкала с 4,5 или 10 градациями. Например:

– отлично (очень высокий уровень качества) — от 8 до 10;
– хорошо (выше среднего уровня) — от 5 до 8;
– удовлетворительно (ниже среднего уровня) — от 5 до 3;
– удовлетворительно — от 3 до 2;
– плохо (неприемлемый уровень качества) — ниже 2 баллов.

Если свойство можно количественно измерить параметрами, последний также переводится в балл:

$$U = (X - X_m)/(X_b - X_m) \cdot U_b, \quad (6)$$

где U — балльная оценка X-параметра; X_m, X_b — соответственно нижнее и верхнее предельное значение параметра в натуральных единицах; U_b — верхний предел бальной шкалы.

Метод экспертных экономических оценок рекомендуется авторами в тех случаях, когда одни виды затрат по вариантам (например, затраты на изготовление) поддаются расчету, а другие виды затрат (например, эксплуатационные издержки) из-за ограниченности информации невозможно объективно оценить [1], [12]. В таком случае рекомендуется перечень оценочных показателей, которые характеризуют факторы, влияющие только на оцениваемый вид затрат. Например, если нужно оценить эксплуатационные издержки, рекомендуются такие показатели как ремонтопригодность, безотказность, долговечность, энергетический КПД и т.д. Критерии формулируются так, чтобы они однонаправленно влияли на оцениваемые затраты. Правила построения шкал и значение коэффициентов весомости применяется аналогично правилам, рассмотренным ранее. Для каждого варианта рассчитывается совокупный показатель качества (полезности)

$$Q = \sum_{i=1}^{m} U_i \cdot V_i. \quad (7)$$

Величина затрат находится по показателю качества с помощью стоимостного множителя, показывающего «цену» одного балла. Например, переменные эксплуатационные издержки, снижающиеся с ростом показателя Q, рассчитываются

$$U = U_б(Q_{max} - Q), \quad (8)$$

где $U_б$ — удельные эксплуатационные издержки, приходящиеся на один балл (стоимостной множитель); Q_{max} — максимальный уровень показателя качества «эталонного» решения.

Стоимостные множители (руб./балл) определяются и нормируются на основе статистического анализа данных об экономических показателях известных аналогичных конструкций [14], [18]. Для оценок эксплуатационных показателей формируется группа экспертов. Основные требования к экспертам — это компетентность и независимость суждений.

В работах [6], [7] – [9], [19] и др. в основу разработки методики оценки качества судового дизеля положено использование прямых и экспертных оценок с их последующей математической обработкой с использованием функции Харрингтона. Такой подход требует рассмотрения и решения следующих частных задач:

– анализа особенностей функционирования судового дизеля как сложной технической системы на всех этапах его жизненного цикла, его элементной базы как параметра системы;
– выбора его математической модели качества;
– научного обоснования и разработки методики оценки;
– выбора наиболее рациональных конструкторских решений на этапе проектирования, технологий их эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Учитывая многообразие комплектующих узлов и деталей дизеля, многообразие существующих технологий, применяемых при их изготовлении, техническом обслуживании и ремонте, а также тесную связь с другими параметрами системы (многообразием марок двигателей, комплектаций на их основе дизельных установок, проектов судов, судостроительных и судоремонтных верфей и т. п.), уровень качества дизеля на каждом этапе функционирования как параметр системы может быть представлен в виде функции пяти аргументов [6], [9], [19], [20]:

$$\text{УКД} = f\,(\varepsilon, \text{Э}, \text{К}, \text{Т}, \text{П}), \tag{9}$$

где ε — экологическая эффективность конструкции, зависящая от его комплектации и использованной технологии нейтрализации NO_x, CO, CH, сажи и других вредных веществ, типа катализатора и его носителя и т. д.; Э — экономичность конструкции, зависящая от комплектации двигателя, использующихся технологий при их изготовлении, эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте и др.; К — конструктивные особенности двигателей, их габаритов, массы, объемов; Т — технологичность изготовления, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта двигателя, определяющая возможность применения доступных материалов и оборудования; П — производственные трудозатраты на изготовление, монтаж, техническое обслуживание и ремонт.

Многочисленность коэффициентов и показателей, характеризующих уровень качества дизеля как параметра системы, и отсутствие достоверной информации по каждому из них делает выбор инженерных решений на каждом этапе жизненного цикла для оптимального функционирования системы более высокого уровня чрезвычайно сложным. Поэтому важное место в работе уделено разработке и реализации методики оценки и выбора инженерного решения на основе решения задачи «черного ящика», выбору математической модели и параметров, характеризующих ее.

В общем виде рассматриваемая кибернетическая система «черного ящика» с зависимостью УКД = *f* (ε, Э, К, Т, П) в основе схематично представлена на рис. 1 и включает входы и выходы. Причем, каждому уровню входов отвечают определенные значения выходов, которые через соответствующие потенциалы $D_{\text{СВ}j}$ оценивают уровень сравниваемых инженерных решений по двигателю. В качестве одного из основных вопросов описания функционирования рассматриваемой системы является введение количественной характеристики уровня качества в виде числа, которое давало бы возможность оценить ее в целом. Такое число должно количественно характеризовать, насколько эффективно она обеспечивает достижение целей системы.



Рис. 1. Кибернетическая система «черного ящика»

Анализ сущности показателей качества, математических моделей, методик ее оценки и выбора позволил принять в качестве целевой функции рассматриваемой технической системы зависимость

$$D_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} d_{ij}^{\lambda}} \tag{10}$$

или при поэтапной комплексной оценке на всех этапах жизненного цикла —

$$D_{jk} = \sqrt[n_k]{\prod_{i_k=1}^{n_k} d_{ijk}}, \tag{11}$$

где D_j, D_{jk}, d_{ij}, d_{ijk} — безразмерные числа (потенциалы), характеризующие рассматриваемую техническую систему по всем показателям с учетом их веса, *j*-е инженерное решение по комплексу

показателей и *i*-й показатель *j*-го инженерного решения; n и n_k — показатели в комплексе; λ — шкалирующий коэффициент, учитывающий вес *i*-го показателя.

Качественные и количественные показатели y_i, характеризующие техническую систему, определены исследователями, их численные значения могут определяться путем экспертного опроса с присвоением соответствующих баллов.

Перевод значений показателей в безразмерные числа может осуществляться с помощью номограммы, построенной на основе кривой желательности Харрингтона по уравнению

$$d_{ij} = \exp\left[-\left(e^{-Y_{ij}}\right)\right], \tag{12}$$

где Y_{ij} — безразмерная величина *i*-го показателя, характеризующего *j*-ю технологию, линейно связанная с соответствующим натуральным показателем Y_{ij} , определяемым по формуле

$$Y_{ij} = 2m\frac{\left(Y_i - 0{,}8Y_{i\min}\right)}{\left(Y_{i\max} - 0{,}8Y_{i\min}\right)} - m, \tag{13}$$

где $Y_{i\max}$, $Y_{i\min}$ — соответственно максимальное и минимальное численные значения Y_j; m — предел изменения кривой желательности по оси абсцисс, начиная от нуля.

Если численное значение $Y_{i\max}$ соответствует наименее приемлемому уровню данного показателя, то знак при Y_i' нужно изменить на противоположный.

Кривая желательности может быть принята следующей:

– при $d = 1{,}00$ — уровень значений показателя Y_i, обеспечивающий максимально возможный положительный эффект при внедрении технологии;

– при $1{,}00 < d < 0{,}80$ — реально достигнутый наибольший положительный эффект;

– при $0{,}80 < d < 0{,}60$ — допустимый и довольно высокий уровень показателя Y_i;

– при $0{,}60 < d < 0{,}37$ — допустимый и достаточный уровень показателя Y_i;

– при $0{,}37 < d < 0$ — реально достигнутый наихудший уровень показателя Y_i ;

– при $d = 0$ — сравниваемая технология заведомо неприемлема для практической реализации.

При этом для множества взаимозаменяемых вариантов составляется перечень оценочных показателей, характеризующих то или иное свойство изделия. Показатели должны формулироваться так, чтобы с их улучшением улучшался и общий технико-экономический уровень решения.

В работах [9], [10] рассматриваемая кибернетическая модель определения технического облика вновь создаваемого судового дизеля общем виде представлена в виде функции трех групп аргументов: целевых, конструктивных и эксплуатационных факторов, на основе которых происходит синтез вариантов конструкции дизеля. Анализ математических моделей, методик оценки и выбора наиболее рациональных решений позволил авторам принять в качестве функции оценки качества зависимости, широко используемые в квалиметрии. С целью получения данных, лежащих в основе методики, выполнены исследования по выбору признаков оценивания технического облика дизелей.

Основные параметры, характеризующие конструкцию и эксплуатационную эффективность дизеля на этапе его проектирования приняты на основе работ ведущих ученых: среднее эффективное давление — p_{me}; удельный расход топлива — b_e; удельная масса двигателя — $m_{уд}$; скорость поршня — c_m; цилиндровая мощность — $P_ц$; обороты коленчатого вала — n; отношение хода поршня к диаметру цилиндра — s/d; степень сжатия — ε; степень повышения давления — λ; максимальное давление сгорания — $p_{\max}$; максимальная среднемассовая температура цикла — $T_{\max}$; температура отработавших газов — T_g.

В ходе исследований пределы изменения выбранных параметров рассматривались в границах, достигнутых для современных высокооборотных судовых дизелей. Приняты конструктивные ограничения: s/d — от 1,1 до 1,26; ε — в пределах 12 – 16. В качестве параметров, косвенно характеризующих тепловую и механическую напряженность судового двигателя в эксплуатационных условиях, рассматривались: c_m — в диапазоне 10 – 13 м/с; $p_{\max}$ — в диапазоне 15 – 23 МПа; λ — в пределах от 1,05 до 1,3; $T_{\max}$ и T_g — соответственно в пределах до 195 К и 873 К. В каче-

стве целевых показателей в модели рассматриваются параметры, определяющие конструкцию и назначение дизеля $P_{ц}$, n и p_{me}.

Важным этапом жизненного цикла судового двигателя является этап его использования по назначению. Как правило, в эксплуатационной практике состояние эксплуатирующегося двигателя оценивается мерой утраты им работоспособности и экономичности. Обычно оценка технического состояния производится в результате «разборки» двигателя. Такие операции трудоёмки и не всегда целесообразны.

Применение средств и методов технического диагностирования в практике эксплуатации двигателей дает возможность решать задачи повышения эксплуатационного КПД и ресурса за счет поддержания высокого технического уровня ДВС и понижения затрат эксплуатации.

Разработке методики совершенствования системы технического обслуживания и ремонта судовых энергетических комплексов посвящена работа К. А. Алексеева [8]. В этой работе на основании анализа различных систем ТО, ремонта и их эволюции, а также анализа целей и задач отрасли предложена система технической эксплуатации ледоколов при ограниченных ресурсах в виде совокупности взаимосвязанных организационно-технических и технологических мероприятий и средств, необходимых и достаточных при выделенных ресурсах для получения максимальной эффективности технической эксплуатации ледоколов с наибольшим технико-экономическим эффектом. Показано, что для обеспечения необходимого качества ледоколов необходима разработка системы информационной поддержки принимаемых решений на всех этапах жизненного цикла судна: проектирования, эксплуатации, технического обслуживания, ремонта и утилизации. Это требует разработки математических моделей и методов, позволяющих производить оценку качества дизельной установки в условиях эксплуатации.

Вопросы, связанные с анализом технического качества судовых дизелей в условиях эксплуатации нашли отражение в работах А. А. Обозова, В. А. Лашко, А. Ю. Конькова, А. Ю. Самойленко и др. Их анализ показывает, что в настоящее время не существует проблем при выборе параметров, описывающих состояние двигателя [2] – [4], [14]. Они подбираются, как правило, достаточно информативными, что дает возможность отнести оценку технического состояния двигателя к одному из возможных «классов диагнозов». В рассматриваемой области остается задача определения эталонной модели, позволяющей прогнозировать требуемое качество судового двигателя в любой момент его эксплуатации. Для решения указанной задачи, как правило, используются статистические модели. Некоторые авторы предлагают использовать для целей оценки и улучшения показателей качества судовых дизелей математические модели [6], [9], [20], [21].

Автор данной статьи предлагает использовать для указанных целей математическую модель численного моделирования рабочего процесса в цилиндре дизеля и смежных с ним системах «Импульс». Численное моделирование рабочего процесса как метод исследования характеризуется следующими принципами:

– описание отдельных процессов в системе двигателя осуществляется, исходя из общих теоретических положений и обобщенных эмпирических зависимостей [1], [2], [12], [14];

– реализация замкнутого моделирования на основе рассмотрения взаимосвязи отдельных процессов между собой и окружающей средой с использованием возможности получения сходящегося решения в течение нескольких циклов при произвольных начальных условиях;

– рациональное применение моделей различной сложности с учетом конкретных требований к точности решения задачи и при наличии ресурса на основе проверки адекватности моделей путем сопоставления с экспериментальными данными и сравнительных расчетов [1], [12];

– базирование на общих методологических концепциях создания автоматизированных систем различного назначения, включая интерактивный метод разработки программ на ЭВМ по унификации и преемственности модельных и алгоритмических решений, широкую автоматизацию управления ходом моделирования и выдачу результатов.

Для описания нестационарных процессов в рабочем цилиндре и выпускной системе используются квазистатистические дифференциальные уравнения энергетического и массового балан-

сов с учетом переменного состава и переменных теплоемкостей рабочего тела. Интегрирование системы дифференциальных уравнений энергетического и массового балансов ведется методом Рунге — Кутта с переменным шагом без двойного пересчета. Обеспечение замкнутого моделирования осуществляется путём автоматической балансировки мощностей компрессора надувного воздуха и газовой турбины с учетом переменных КПД турбины и компрессора, гидравлических и тепловых потерь в газовоздушном тракте, параметров окружающей среды.

Комплексный подход к разработке общей математической модели позволяет обеспечить определение параметров и характеристик двух- и четырехтактных дизелей с различными схемами и системами воздухоснабжения. Для удобства проведения исследований моделирование номинального режима ведется с настройкой рабочего процесса и системы наддува [1], [11], [12]. При этом автоматически определяются регулировки двигателя и параметры воздухоснабжения (угол опережения впрыска топлива, сечение соплового аппарата турбины, коэффициенты гидравлических и тепловых потерь) по задаваемым значениям максимального давления сгорания, КПД турбокомпрессора давления наддува и других величин.

Полученные результаты настройки рабочего процесса используются для моделирования рабочего процесса двигателя с определением параметров системы наддува во всей области рабочих режимов, задаваемых величиной подачи топлива и чистотой вращения коленчатого вала двигателя.

Выводы

1. Проведен обзор исследований по оценке технического уровня качества судовых двигателей, который позволил выработать рациональные методологические решения задачи качества диагностирования судовых двигателей.

2. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечены применением известных методов системного и логического анализа и синтеза и общепризнанного математического инструментария, а также подтверждены результатами проведенных исследований.

3. Приведенная методика опробована на конкретных двигателях.

Список литературы

1. *Иванченко А. А.* Судовые энергетические установки, основы проектирования нестандартных судовых энергетических установок / А. А. Иванченко, И. А. Боровикова, В. И. Резниченко. — СПб.: СПГУВК, 2010.

2. *Конкс Г.* Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. Конкс, В. Лашко. — М.: Машиностроение, 2005.

3. *Костылёв И. И.* Двойное топливо в современной судовой энергетике / И. И. Костылёв, М. К. Овсянников // Эксплуатация морского транспорта. — 2013. — № 1 (71). — С. 35–39.

4. *Новиков Л. А.* Современные и перспективные технологии для организации малотоксичной работы двигателей / Л. А. Новиков // Двигателестроение. — 2005. — № 24. — С. 8–15.

5. *Сорокин В. А., Иванов М. Ю.* Сравнительный анализ технико-эксплуатационных характеристик отечественных и зарубежных судовых дизельных двигателей мощностью до 3 МВт // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — Вып. 34. — С. 111–131.

6. *Иванченко А. А.* Комплексное снижение вредных выбросов дизельными установками судов речного флота: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.08.05 / А. А. Иванченко. — СПб., 1999.

7. *Молодцов Н. С.* Восстановление изношенных деталей судовых механизмов / Н. С. Молодцов. — М.: Транспорт, 1988.

8. *Алексеев К. А.* Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта судовых энергетических установок ледоколов: автореф. дис. .... канд. техн. наук: 05.08.05 / К. А. Алексеев. — СПб., 2008.

9. *Щенников И. А.* Прогнозирование эксплуатационных показателей дизельной энергетической установки судна на этапе проектирования ее элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05 / И. А. Щенников. — СПб., 2015.

10. *Иванченко А. А.* Методика определения и оценки технического облика судового высокооборотного дизеля / А. А. Иванченко, И. А. Щенников // Двигателестроение. — 2014. – № 4 (258). — С. 10–15.

11. Дизельные и газовые двигатели: каталог. — СПб.: ООО «ЦНИДИ», 2009.

12. *Боровикова И. А.* Оптимизация работы судовой энергетической установки / И. А. Боровикова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 42–44.

13. *Возницкий И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания: в 2 т. / И. В. Возницкий. — М.: Моркнига, 2008.

14. *Сорокин В. А.* Современные условия эксплуатации судовых дизелей / В. А. Сорокин // Перспективные транспортные средства: сб. науч. тр. — 2002. — С. 196–211.

15. *Ходаков Ю. С.* Оксиды азота и теплоэнергетика. Проблемы и решения / Ю. С. Ходаков. — М.: ООО «ЭСТ-М», 2001.

16. Gas Engines Propulsion // Marine engineers review, IMarES'T, 2003 and Dec / Jan 2005.

17. *Thijssen B.* Dual-Fuel-Electric LNG carriers / B. Thijssen // Proc. of the 28th Annual Event The Motor Ship Propulsion Conference. — Copenhagen, April, 2006.

18. *Семенюк А. В.* Энергетические установки судов для перевозки природного газа / А. В. Семенюк, С. А. Гармаш // Вестник МГУ. — 2010. — № 38. — С. 45–51.

19. *Авдевин Д. Е.* Повышение экологической безопасности дизельных установок судов выбором рациональной технологии нейтрализации оксидов азота в отработавших газах: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.08.05 / Д. Е. Авдевин. — СПб., 2003.

20. *Иванченко А. А.* Проблемы эксплуатации судов с дизельными установками нового поколения и задачи по их совершенствованию / А. А. Иванченко, И. А. Щенников, А. А. Иванченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 26–33.

21. *Иванченко А. А.* Выбор математической модели для описания характеристики выгорания топлива при доводке судового дизеля с аккумуляторной топливной системой / А. А. Иванченко, В. А. Макуров, И. А. Щенников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 31–37.

УДК 621.431:629

В. В. Мартьянов,
ст. преп.

РАСЧЕТ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА ПРОГУЛОЧНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТЕПЛОХОДА «ЭРИДАН» ПР. Р19-1

A SHIP SHAFTING TORSIONAL OSCILLATION CALCULATION OF THE PLEASURE PASSENGER SHIP «ERIDANUS» PR.R19-1

Статья посвящена вопросу безопасной работы судового валопровода. С помощью расчета крутильных колебаний производится определение рабочих безрезонансных режимов работы двигателя внутреннего сгорания, входящего в состав валопровода. Актуальность представленной статьи заключается в анализе результатов проведенных математических расчетов, на основании которых можно дать рекомендации о снижении вибрации и увеличении надежности судового валопровода, а также рекомендовать некоторые конструктивные изменения.

В работе проведен расчет основных характеристик свободных крутильных колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода «Эридан» проект Р19-1. Рассмотрены конструкции узлов пропульсивного комплекса судна. Описан алгоритм и приведена программа по расчету свободных

крутильных колебаний судового валопровода на персональном компьютере. Заключительная процедура расчета свободных колебаний связана с построением частотной диаграммы. Она позволяет определять резонансные режимы эксплуатации валопровода. С использованием математической модели, и по результатам расчетов определен наиболее опасный участок валопровода. Информация, полученная на этом этапе, служит исходной для последующих расчетов и может быть использована для установления резонансов колебаний.

The article focuses on the safe operation of the ships shafting. Using calculations of torsional vibrations is to define the operating resonatorless modes of the internal combustion engine is part of the shafting. The relevance of this article is contained in studying results of math calculations om the basis of which recommendations of reducing oscillation and increasing the reliability of ship shafting can be made. Some constructive changes also can be recommended.

The calculation of basic characteristics of free torsional oscillation of a ship shafting of the pleasure passenger ship «Eridanus» (design R19-1) is carried out in the research. Construction of units, propulsion system of a ship are studied. The algorithm is described, and a program for computer calculations of free torsional oscillation of a ship shafting is presented. The final procedure for the calculation of free vibrations associaled with the construction of a freguency histogram. It allows to determine resonant modes of operation shafting. Using math model and results of calculations was defined the most dangerous plot shafting. Information getting on this stage of research can be considered as a foundation for further calculations and used for setting the resonances of oscillation.

Ключевые слова: судно, валопровод, гребной вал, гребной винт, эксплуатация, механические колебания, вибрация, отказ.

Key words: ship, shafting, propeller shaft, screw, exploitation, oscillazioni meccaniche, vibration, refusal.

Введение

Валопровод — один из важнейших узлов судовой энергетической установки. Условия, в которых находится валопровод при эксплуатации — относительно тяжелые вследствие коррозии при воздействии забортной воды, динамических напряжений, знакопеременных нагружений при действии изгибающего момента от веса винта и консольной части вала. Возникающие в валопроводе знакопеременные напряжения в некоторых случаях могут превысить предел усталости материала вала и вызвать его разрушения, а также быть причиной поломки муфт, зубчатых колес редуктора и других связанных с ними деталей. Вибрации двигателей и отдельных конструкций корпуса судна также могут быть следствием крутильных колебаний валопровода [1].

Под действием перечисленных факторов нагрузка на вал оказывается неравномерной из-за изменений частоты вращения, изнашивания дейдвудных подшипников (особенно концевого вблизи винта), искривления оси вала, увеличения амплитуды изгибающих напряжений. Кроме того, во время плавания практически невозможен контроль работы гребного вала. Для этого судно должно быть поднято в док, слип или другие судоподъемные сооружения либо необходимы сложные работы для выполнения контроля на плаву. Последнее сопряжено с большими финансовыми расходами.

Для пассажирских прогулочных судов проблема износа валопроводов и его элементов особенно актуальна. В связи с относительно малой массой и достаточно большой скоростью элементы пассажирских и маломерных судов обладают большей виброактивностью. Они испытывают большие колебания и вибрации в процессе своей работы, а значит, больше подвержены деформации и износу [2] – [5]. Помимо указанного негативного влияния колебаний на конструкции машины они также оказывают вредное воздействие на людей, вызывая вибрационные болезни. Например, при частотах колебаний 5 – 7 Гц наступает резонанс в системе кровообращения, а при частотах 200 Гц — нарушение вестибулярного аппарата. Под действием вибрации происходят изменения в нервной и костно-суставной системах, наблюдается падение мышечной силы и веса, нарушается острота зрения и светоощущения, ослабевает память. Значительное влияние вибрации на организм человека обусловлено его непосредственным контактом с вибрирующими поверхностями [6].

Основная часть

Произведем расчет свободных крутильных колебаний валопровода судна «Эридан» проект Р19-1. Расчет крутильных колебаний предусматривает определение резонансных частот вращения валопровода и напряжений, возникающих в нем от действия этих колебаний. Источником крутильных колебаний служат переменные крутящие моменты, действующие как со стороны двигателя, так и гребного винта [7] – [10].

Расчет крутильных колебаний выполняем по алгоритму, который предусматривает:

– составление расчетной модели валопровода в виде дискретной модели;

– вычисление параметров расчетной модели;

– расчет частот и форм свободных колебаний;

– построение частотной диаграммы и определение резонансных частот вращения валопровода.

Составление расчетной модели и вычисление ее параметров

Данные по гребному винту: гребной винт фиксированного шага. Характеристики: диаметр — 0,7 м; шаговое отношение — 1,1; дисковое отношение — 0,3; число лопастей — 4; момент инерции с учетом присоединенной массы воды — 0,398 кг · м^2.

Данные по гребному валу представлены на рис. 1.

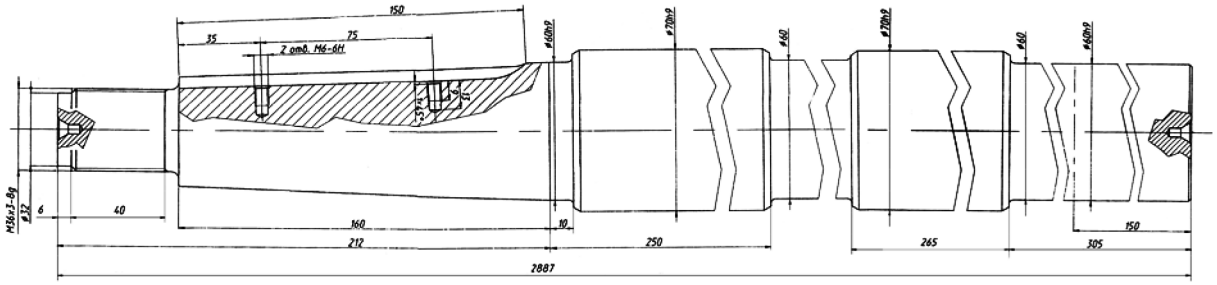


Рис. 1. Эскиз гребного вала

Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Моменты инерции и крутильная податливость гребного вала

Номер участка	L, м	d, м	θ, кг^2	e, H^{-1}· м$^{-1}$
1	0,305	0,06	0,003	$2{,}981 \cdot 10^{-6}$
2	0,265	0,07	0,0049	$1{,}398 \cdot 10^{-6}$
3	0,250	0,07	0,0046	$1{,}319 \cdot 10^{-6}$
4	0,160	0,06	0,0015	$1{,}564 \cdot 10^{-6}$
5	0,04	0,032	$5{,}2 \cdot 10^{-5}$	$2{,}951 \cdot 10^{-6}$
6	0,006	0,032	$4{,}8 \cdot 10^{-6}$	$7{,}249 \cdot 10^{-7}$
Σ	—	—	0,0142	$1{,}093 \cdot 10^{-5}$

Данные по промежуточному валу: промежуточный вал-муфта CV15 «Aquadrive1» стальной, имеет фланцы, изготовленные заодно с ним. Эскиз вала показан на рис. 2. Момент инерции и крутильная податливость промежуточного вала подсчитываются для каждого участка в отдельности по всем известным формулам. Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Моменты инерции и податливость промежуточного вала муфта CV15 «Aquadrive1»

Номер участка	*L*, м	*d*, м	θ, кг^2	*e*, H^{-1}·м$^{-1}$
1	0,018	0,2	0,022	$0{,}142 \cdot 10^{-7}$
2	0,04	0,11	0,004	$0{,}365 \cdot 10^{-7}$
3	0,11	0,07	0,002	$5{,}804 \cdot 10^{-7}$
4	0,012	0,07	0,0004	$0{,}432 \cdot 10^{-7}$
5	0,028	0,11	0,003	$1{,}231 \cdot 10^{-7}$
Σ	—	—	0,03	$6{,}803 \cdot 10^{-7}$

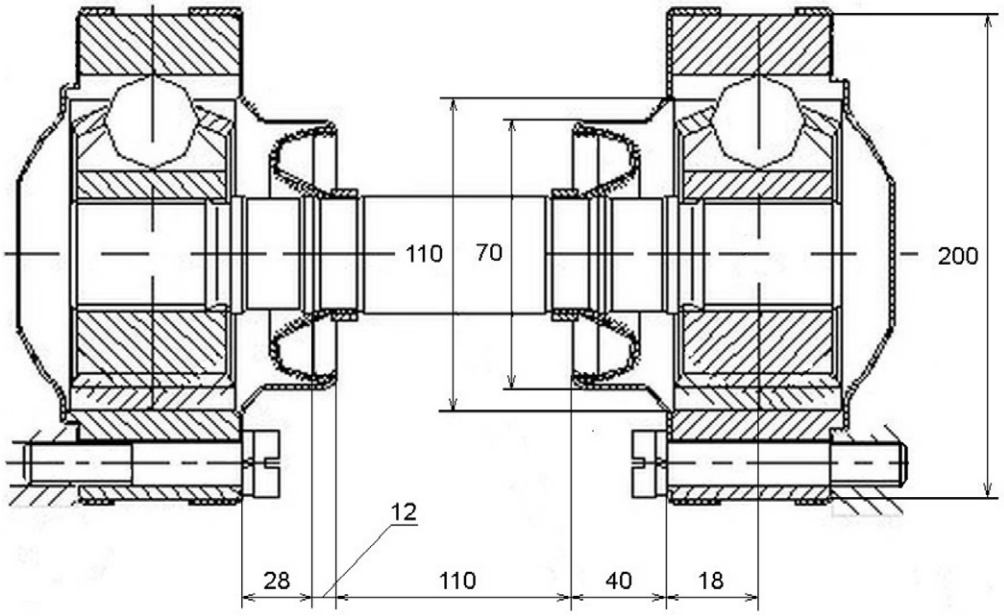


Рис. 2. Промежуточный вал муфта CV «Aquadrive1»

Момент инерции и податливости кормовой части (рис. 3) коленчатого вала представлен в табл. 3.

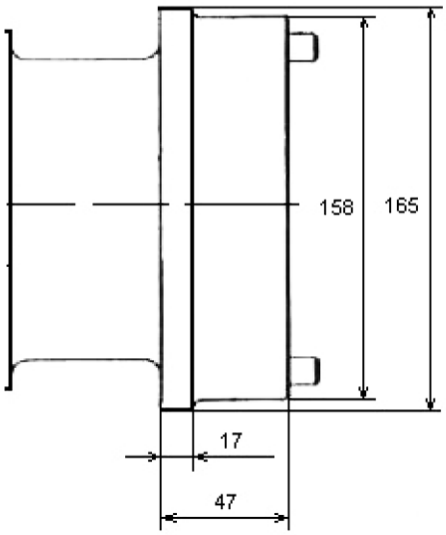


Рис. 3. Кормовой участок коленчатого вала двигателя ЯМЗ-236

Таблица 3

Момент инерции массы и крутильная податливость кормового участка коленчатого вала

Номер участка	L, м	d, м	θ, кг^2	e, $H^{-1} \cdot$ м$^{-1}$
1	0,047	0,158	0,022	$9{,}52 \cdot 10^{-9}$
2	0,017	0,163	0,009	$3{,}04 \cdot 10^{-9}$
∑	—	—	0,031	$1{,}26 \cdot 10^{-8}$

Составление дискретной модели

Дискретная модель, предназначенная для расчета крутильных колебаний, показана на рис. 4. Она составлена в соответствии с изложенными рекомендациями и представляет собой простую цепную схему, состоящую из восьми масс: массы *1 – 3* идеализируют коленчатый вал дизеля, масса *4* — маховик, масса *5 – 6* — шестерни редуктора, *7* — промежуточный вал муфта CV «Aquadrive1», масса *8* — гребной винт.

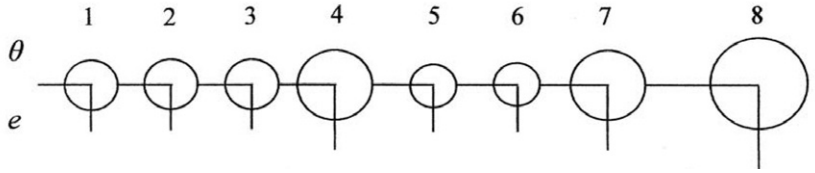


Рис. 4. Дискретная модель валопровода

Параметры дискретной модели, которые служат исходными данными для дальнейших расчетов, приведены в табл. 4. Переход к безразмерным параметрам выполнен с помощью следующих зависимостей:

$$\upsilon = \frac{\theta_i}{\theta_0},$$

$$E_{i,i+1} = \frac{e_{i,i+1}}{e_0},$$

где θ_0 и e_0 — постоянные дискретной модели; принимаем $\theta_0 = 0{,}0545$ кг · м^2 и $e_0 = 3{,}281 \cdot 10^{-8}$, $H^{-1} \cdot$ м$^{-1}$.

Таблица 4

Параметры дискретной модели судового валопровода

№ массы	e, н$^{-1} \cdot$ м$^{-1}$	θ, кг · м^2	i	e', н$^{-1} \cdot$ м$^{-1}$	θ′, кг · м^2	E	ϑ
1	$3{,}281 \cdot 10^{-8}$	0,0545	1	$3{,}281 \cdot 10^{-8}$	0,0545	1	1
2	$3{,}281 \cdot 10^{-8}$	0,0545	1	$3{,}281 \cdot 10^{-8}$	0,0545	1	1
3	$3{,}281 \cdot 10^{-8}$	0,0545	1	$3{,}281 \cdot 10^{-8}$	0,0545	1	1
4	$0{,}593 \cdot 10^{-7}$	1,347	1	$0{,}593 \cdot 10^{-7}$	1,347	1,807	24,715
5	$0{,}925 \cdot 10^{-7}$	0,682	1,125	$1{,}170 \cdot 10^{-7}$	0,539	1,356	9,889
6	$6{,}803 \cdot 10^{-7}$	0,0188	1,125	$8{,}605 \cdot 10^{-7}$	0,014	26,22	0,2568
7	$1{,}093 \cdot 10^{-5}$	0,0194	1,125	$1{,}382 \cdot 10^{-5}$	0,015	421,2	0,2752
8		0,58			0,458		8,4036

Расчет свободных колебаний

Расчет свободных колебаний выполняется по разработанной автором программе FREQUENS на языке Turbo Pascal. В основе этой программы лежит алгоритм метода цепных дробей [11]. Исходные данные для расчета берутся непосредственно из рис. 4 и табл. 4.

Расчеты показали, что в исследованном диапазоне 0 – 300 Гц имеется одна одноузловая форма колебаний с частотой n_e = 67,409 Гц.

Заключительная процедура расчета свободных колебаний связана с построением частотной диаграммы. Она позволяет определять резонансные режимы эксплуатации валопровода. Частотную диаграмму строят в прямоугольной системе координат. Горизонтальными линиями на диаграмме отмечают частоты свободных колебаний, а лучами в виде пучка прямых — частоты вынуждающих моментов. Точки пересечения лучей с горизонтальными линиями указывают на резонансы частоты вращения.

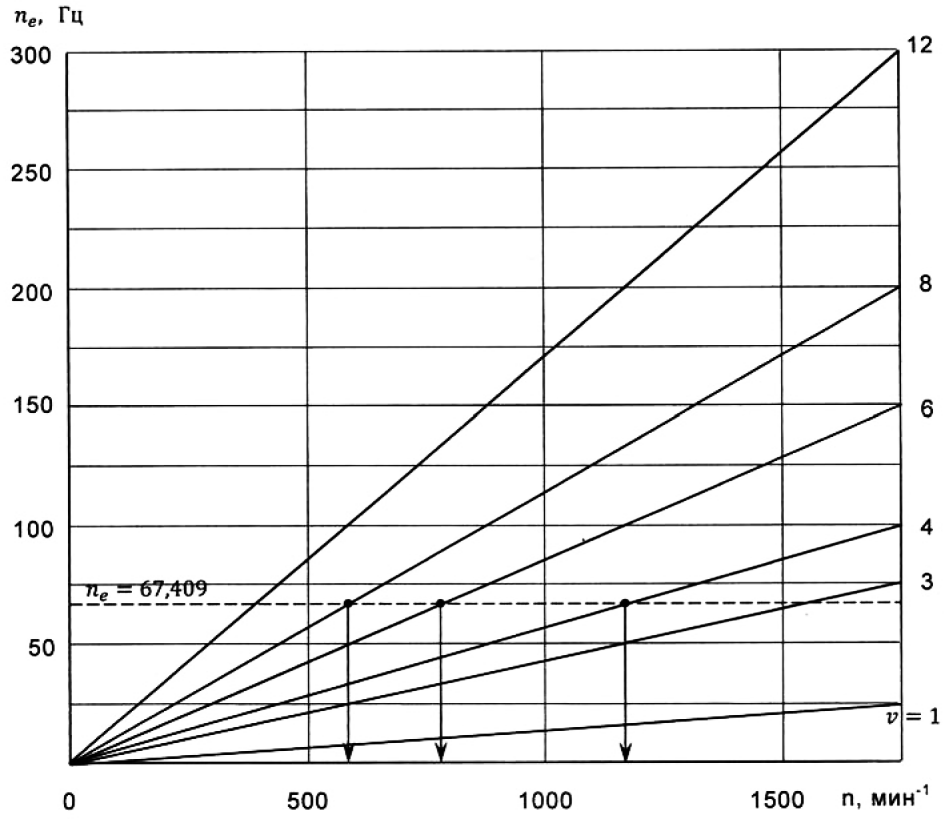


Рис. 5. Резонансные частоты вращения валопровода

Из частотной диаграммы, показанной на рис. 5, следует, что в эксплуатационном режиме частот вращения валопровода пассажирского теплохода «Эридан» проекта Р19-1 наблюдаются следующие резонансы крутильных колебаний:

– резонанс четвертого порядка одноузловой формы колебаний (лопостная частота), соответствующий частоте вращения 1167 мин$^{-1}$;

– резонанс шестого порядка одноузловой формы (моторная частота), соответствующий частоте вращения 775 мин$^{-1}$;

– резонанс восьмого порядка одноузловой формы (моторная частота), соответствующий частоте вращения 583 мин$^{-1}$.

Для всех указанных резонансных частот вращения наиболее опасным сечением валопровода будет место, где располагается узел. Таким местом, как следует из рис. 6, является участок валопровода, соединенного с винтом.

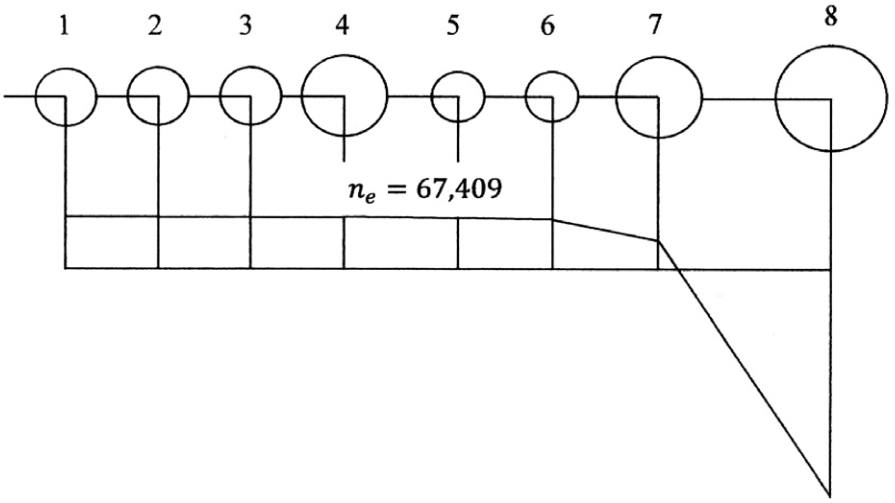


Рис. 6. Одноузловая форма свободных колебаний

Выводы

В заключение следует отметить, что крутильные колебания являются причиной разнообразных аварий. Особенно опасными они становятся в высокооборотных установках, поэтому для таких установок расчет крутильных колебаний является практической необходимостью.

Представленные в данной статье расчеты являются предварительными. После уточнения проектных решений расчеты следует повторить с максимальным приближением к реальности. Дополнительно по результатам моделирования можно произвести расчет валопровода на выносливость и долговечность. Кроме того, необходимо определить нагруженность дейдвудных подшипников и оценить их ресурс. Указанные задачи не относятся к тривиальным, однако на современном уровне машиностроения эти расчеты являются обязательными, для их реализации разработаны соответствующие методики.

Список литературы

1. *Тимошенко С. П.* Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. — М.: Изд-во КомКнига, 2006.

2. *Мартьянов В. В.* Проблемы и пути технического обеспечения безопасности прогулочных пассажирских судов / В. В. Мартьянов // Материалы межвузовской науч.-практ. конф. «Водный транспорт России: история и современность». — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2009. — Кн. 3. — С. 80–85.

3. *Мартьянов В. В.* Условия работы и возможные причины вибрации на прогулочных пассажирских судах под действием крутильных колебаний и поперечных колебаний / В. В. Мартьянов // Материалы 5-й межвузовской науч.-практ. конф. «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России». — СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2014. — С. 131–135.

4. *Narasaiah N.* Initiation and growth of micro-cracks under cyclic loading / N. Narasaiah, K. K. Ray // Materials Science and Engineering A. — 2008. — Pp. 48–59.

5. *Чура М. Н.* Прогнозирование начальной стадии усталостного разрушения судовых гребных валов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.08.05 / М. Н. Чура. — Новороссийск, 2011.

6. *Ломов О. П.* Физические факторы обитаемости кораблей и судов / О. П. Ломов, И. М. Ахметзянов, М. О. Соколов. — СПб.: Судостроение, 2014.

7. *Мартьянов В. В.* Расчет характеристик колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода «Волхов-1» (проект «Мойка») / В. В. Мартьянов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 34–37.

8. *Мартьянов В. В.* Расчет характеристик колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода типа «Фонтанка» (проект Р118) / В. В. Мартьянов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 1 (XIII). — С. 43а–46.

9. *Румб В. К.* Прочность судового оборудования. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов / В. К. Румб. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2008.

10. *Мартьянов В. В.* Расчет крутильных колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода «Максимус» // Материалы 6-й межвузовской науч.-практ. конф. «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 14 мая 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 146-150.

11. *Хандов А. М.* Программа расчета крутильных колебаний валопровода с четырехтактным двигателем / А. М. Хандов // Труды международного науч.-техн. семинара «Исследования, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2006. — С. 252–253.

УДК [621.74.046:621.83]:[669.15-194:669/78]

В. П. Булгаков,
д-р техн. наук, проф.;

С. С. Уксусов,
ст. преп.;

Л. А. Цапко,
ст. преп.

ВТУЛКА ШАРНИРА ЧЕРПАКОВОЙ ЦЕПИ ЗЕМСНАРЯДА ИЗ ДВУХСЛОЙНОЙ БОРИРОВАННОЙ СТАЛИ

THE DREDGE CHAIN CHERPAKOVA HINGE PLUG FROM TWO-LAYER BORIROVANNY STEEL

Разработана технология производства отливки основной детали шарнира черпаковой цепи из стали 40ГТЛ с переменным химическим составом по бору от наружной поверхности втулки к внутренней. Термическая обработка повысила твердость поверхностных борированных слоев металла до 540 – 570 НВ, обеспечила максимальное сопротивление абразивному износу. Твердость неборированного металла составила 319 НВ. Значительно возросшая ударная вязкость и пластичность структуры промежуточной зоны исключает возможность хрупкого разрушения и расслоений от динамических нагрузок. В процессе эксплуатации металл втулок из борированных отливок показал высокую ударно-абразивную износостойкость, технологичность при монтаже, что позволяет использовать технологию внутреннего борирования не только для втулок, но и для других деталей шарнира черпаковой цепи, произвести замену высокомарганцовистой стали на углеродистую низколегированную с послойным борированием, повысить долговечность земснаряда.

The production technology of casting of the main detail of the hinge of a cherpakovy chain from steel 40GT with a variable chemical composition on pine forest from an external surface of the plug to the internal is developed. Heat treatment increased hardness superficial the borirovannykh of layers of metal to 540 – 570 HB, provided the maximum resistance to abrasive wear. Hardness not of borirovanny metal made 319 HB. Considerably the increased impact strength and plasticity of structure of an intermediate zone excludes possibility of fragile destruction and stratifications from dynamic loadings. In use metal of plugs from the borirovannykh of castings showed high shock and abrasive wear resistance, technological effectiveness at installation that allows to use technology of internal borating not only for plugs, but also for other details of the hinge of a cherpakovy chain, to make replacement of high-manganic steel on carbonaceous low-alloyed with layer-by-layer borating, to increase durability of the dredge.

Ключевые слова: земснаряд, ударно-абразивный износ, отливка, легированная сталь, внутреннее борирование, твердость, ударная вязкость, наклеп, мартенсит, износостойкость, долговечность.

Key words: The dredge, shock and abrasive wear, casting, the alloyed steel, internal borating, hardness, impact strength, peening, martensite, wear resistance, durability.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ дноуглубительного земснаряда, работающего в условиях ударно-абразивного воздействия при значительных динамических нагрузках, определяется комплексом механических свойств деталей соединительных звеньев черпаковой цепи: высокой абразивной износостойкостью поверхностных слоев, контактирующих с грунтом; высокой прочностью и ударной вязкостью; сопротивлением ползучести основного металла. Все эти свойства в одном сплаве можно получить, если использовать сталь, легированную хромом, никелем, вольфрамом, титаном, после термо- и термомеханической обработки, которая должна обеспечить наиболее износостойкую структуру [1].

По характеру структуры износостойкие и высокопрочные материалы делятся на следующие группы:

1) материалы, содержащие небольшое количество легирующих элементов с мартенситной или промежуточной структурой при твердости 160 – 400 НВ (стали типа 15ХГ2С, 20Г5);

2) материалы с аустенитной структурой, износостойкость которых достигается упрочнением в холодном состоянии или обеспечивается созданием мартенситной структуры в поверхностном слое за счет деформации (стали 110 Г13, У15Х25Г2Н4С, у которых твердость после деформации достигает 400 – 500 НВ);

3) материалы с вязкой основой и карбидными включениями; при этом для карбидообразования используют углерод, марганец, хром, титан, вольфрам, молибден, никель и ванадий. К этой группе относятся высокоуглеродистые стали и чугуны (У40 Х20Г2С, У35Х25Г2Т2, У35Х12Г10С с твердостью 480 – 620 НВ);

4) мартенситно-стареющие стали: 25Х5ФМС, 35В9Х3СФ с твердостью после старения 480 – 520 НВ;

5) материалы, дополнительно легированные бором: У35Х20Г2Р3, У12Х8В12Р с твердостью 560 – 630 НВ [2].

Перечисленные сложнолегированные стали дороги и нетехнологичны в связи с тем, что плохо обрабатываются механическими способами, требуют специальной термообработки, а большой расход металла при эксплуатации ограничивает или исключает применение таких материалов в земснарядах.

Экономически целесообразно для работы в абразивной среде использовать углеродистую и низколегированную сталь. После термической и химико-термической обработки или наклепа металл приобретает высокую твердость, способствующую увеличению сопротивляемости изнашиванию. С повышением содержания углерода износостойкость стали возрастает, однако существенное значение имеет не только общее количество углерода, но и его расположение в структуре. Так, износостойкость детали увеличивается в два раза при замене стали 40Х на сталь 20Х после цементации и закалки до твердости 600 НВ [3].

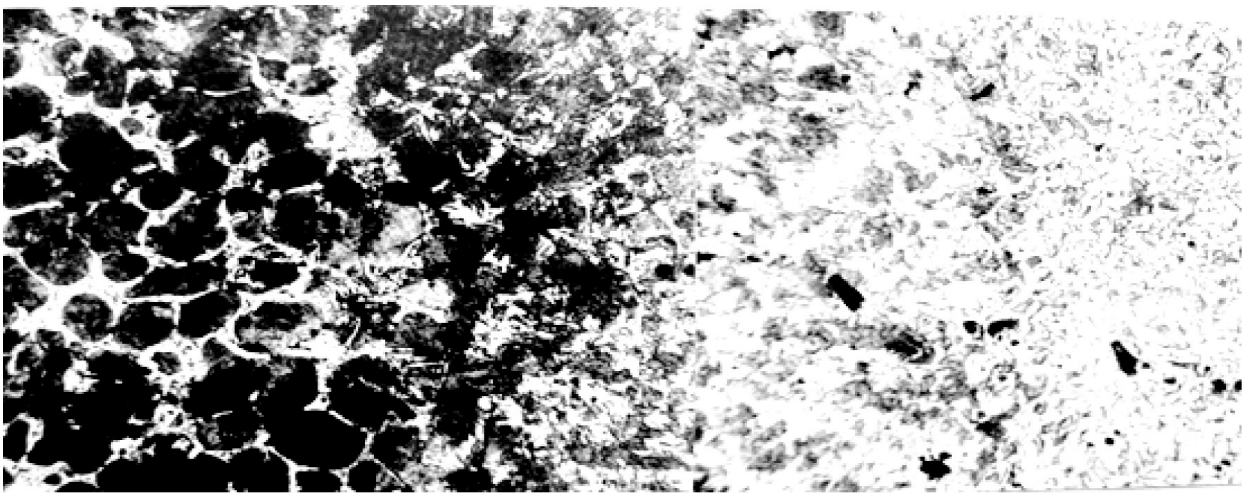
Значительный рост износостойкости достигнут борированием поверхности среднеуглеродистой стали. Борирование производится при температуре 1000 ºС в течение нескольких часов. В результате на поверхности металла образуются покрытия с высокой твердостью до 1800 МПа и износостойкостью в условиях статического нагружения. Высокая твердость борированной поверхности и низкая твердость матрицы (основного металла) при ударах приводит к отслоениям, которые становятся дополнительным абразивом, способствующим ускоренному износу шарнирного механизма в черпаковой цепи [4].

Опытным путем установлено, что абразивный износ двухфазных структур линейно связан с содержанием твердой структурной составляющей сплава. Для эффективного повышения износостойкости необходимо иметь в структуре большое количество твердых включений. Практически получение таких структур весьма затруднительно, поэтому можно сделать вывод о необходимости повышения твердости матрицы (основы сплава) путем введения в металл соответствующих элементов. В связи с этим рациональным способом повышения ударно-абразивной износостойкости может служить внутреннее борирование углеродистых сталей.

Бор — ярко выраженный горофильный легирующий элемент, в металле сосредотачивается по границам зерен, увеличивает устойчивость структуры, понижает критическую скорость закалки и повышает прокаливаемость стали [5]. С целью определения влияния бора на абразивную стойкость металла была изготовлена партия втулок шарнирного механизма черпаковой цепи с различным содержание бора. В процессе эксплуатации земснаряда выявлена не только высокая абразивная износоустойчивость борированного металла, но и его повышенная хрупкость [6]. В результате поиска возможностей устранения хрупкого разрушения борированного металла без потери стойкости против абразивного износа разработана технология изготовления двухслойных втулок. Расплавленную в индукционной печи сталь 40ГТЛ заливали в изложницу центробежной литейной машины. После заливки половины необходимого объема стали струя металла прерывалась и на литниковый желоб насыпалась боросодержащая лигатура по расчету. Затем заливка стали в изложницу продолжалась до конца [7].

По данной технологии получают отливки, у которых внутренние слои металла, контактирующие с абразивной средой, насыщены бором и после соответствующей термообработки приобретают структуру с высокой твердостью, а наружные слои, не содержащие бор, — высокую прочность, высокую ударную вязкость и пластичность. Макро- и микроисследования литых отливок показали четко отличающиеся слои металла с бором и без бора по всей длине втулки. Дефекты в переходной зоне не обнаружены (рисунок).

а) б)



Микроструктура сечения втулки × 100:
из зоны от внутренней поверхности втулки
до центральной оси (содержание бора до 0,5 %) (*а*);
из зоны внешней поверхности (без бора) (*б*)

Термическая обработка отливок — отжиг и нормализация — делают структуру более равновесной, а закалка с отпуском значительно повышают твердость за счет образования мартенсита, бейнита, коагуляции карбидов и боридов. Такая структура литых втулок является хо-

рошим доказательством надежного сплавления слоев металла и невозможности расслоения в процессе эксплуатации под влиянием больших ударных нагрузок. Влияние бора на твердость и ударную вязкость стали 40ГТЛ в литом состоянии, после отжига, нормализации и закалки показано в табл. 1.

Таблица 1

Твердость борированной двухслойной втулки стали 40ГТЛ после термической обработки

№ п/п.	Содержание бора, %	Литое состояние		Отжиг		Нормализация		Закалка		Ударная вязкость МДж/м^2
		HRB	HB	HRB	HB	HRC	HB	HRC	HB	
1	0	71	116	79	140	11	192	40	375	20
2	0,3	85	160	87	167	15	212	53	525	10
3	0,6	90	180	94	201	32	311	54	535	9
4	1,0	98	220	101	235	33	321	55	540	8

В литом состоянии увеличение содержания бора от 0 до 1 % повысило твердость от 116 до 220 НВ, что связано с увеличением скорости затвердевания металла. По границам первичных зерен образуются прослойки боридов, устойчивые при всех видах термической обработки. Отжиг приводит к некоторому оттеснению перлита в центральную часть объемов, окруженных прослойками боридов. Это повышает твердость от 140 до 230 НВ. Нормализация (охлаждение металла на воздухе) привела к повышению твердости за счет образования среднедисперсного сорбита. Закалка в масле максимально повысила твердость борированной стали до 540 – 570 НВ. Структура при этом содержит мелкодисперсный мартенсит-бейнит. Полученная после термообработки структура борированной стали отвечает всем требованиям к износоустойчивому материалу.

Сравнительную абразивную износостойкость отливок из двухслойной борированной стали определяли по скорости весового линейного износа на установке, снабженной вращающимся абразивным кругом диаметром 500 мм. Одновременно изнашивалось три образца, расположенных под углом 120º друг от друга и при одинаковом расстоянии от центра диска, который своим весом прижимал образцы к абразивному кругу. Для равномерности изнашивания диск вращался, причем каждый образец, двигаясь по сложной траектории, проходил одинаковый путь по абразиву [8]. Результаты определения скорости весового и линейного износа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Скорость весового и линейного износа двухслойной борированной втулки стали 40ГТЛ после термической обработки

№ п/п	Содержание бора, %	Литое состояние		Отжиг		Нормализация		Закалка		Ударная вязкость МДж/м^2
		V	*L*	*V*	*L*	*V*	*L*	*V*	*L*	
1	0	14,6	32,4	12,9	30,1	6,	11,2	3,2	8,0	20
2	0,3	9,3	23	8,0	20	3,0	7,2	0,8	1,4	10
3	0,6	5,3	13,7	4,3	12,7	2,7	6,8	0,4	1,2	9
4	1,0	3,9	10,2	3,0	8,0	2,1	4,9	0,3	0,8	8

Скорость весового износа *V*, мг/мин,

$$V = G/3t,$$

где *G* — суммарная потеря массы трех образцом, мг; *t* — время изнашивания, мин.

Скорость линейного износа L, мкм/мин,

$$L = \Delta H / 3t,$$

где ΔH — изменение линейных размеров образцом, мкм; t — время изнашивания, мин.

Разрушение металла при ударно-абразивном воздействии осуществляется путем микрорезания и многократной пластической деформацией поверхности трения. При движении абразивной массы по поверхности скользящих деталей происходит непрерывное деформирование и упрочнение основы металла вместе с мелкими карбидами, рассеянными по всему объему. Это сопровождается наклепом деформированных слоев и заметным сопротивлением абразивному износу [9] .

В литом состоянии борированный металл имеет повышенную твердость, и после всех видов термической обработки абразивный износ снижается с увеличением содержания бора, который является главным фактором получения абразивно-стойкой структуры. Чем выше твердость и ниже пластичность матрицы, тем выше сопротивление сплава истиранию. Максимальное сопротивление абразивному износу наблюдается на втулках, содержащих бор до 1 % при твердости 540 НВ. Наружный слой металла, не содержащий бор, имеет твердость 319 НВ при ударной вязкости 20 МДж/м^2, исключающей хрупкое разрушение [10].

По разработанной технологии изготовлена партия двухслойных втулок с переменным химическим составом по бору от внешней поверхности к внутренней. Отливки технологичны, они хорошо обрабатываются резанием и при монтаже шарнира в цепь трещины и другие дефекты не возникают. В процессе эксплуатации земснаряда металл втулок показал абразивную износостойкость, соизмеримую со сталью Гатфильда (лучшим из известных ударно-абразивно-стойких материалов). Это позволяет использовать технологию внутреннего борирования не только для втулок, но и для других деталей шарнира черпаковой цепи, и произвести замену дорогой марганцовистой стали на борированную углеродистую, увеличить межремонтные сроки, повысить долговечность земснаряда.

Список литературы

1. *Булгаков В. П.* Критерии выбора материала для шарнирных соединений черпаков земснаряда / В. П. Булгаков, С. С. Уксусов, Л. А. Цапко // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. — 2011. — № 3. — С. 141–143.

2. *Меликов В. В.* Многоэлектродная наплавка / В. В. Меликов. — М.: Машиностроение, 1988.

3. *Бернштейн М. Л.* Металловедение и термическая обработка стали / М. Л. Бернштейн, А. Г. Рахштадт. — М.: Металлургия, 1983.

4. *Алиев А. А.* Диффузионное борирование стали и шероховатость поверхности / А. А. Алиев, В. П. Булгакова, Б. С. Приходько // Вестник АГТУ. — 2005. — № 2 (25). — С. 61–64.

5. *Вязников Н. Ф.* Легированная сталь / Н. Ф. Вязников. — М.: Металлургиздат, 1968.

6. *Булгаков В. П.* Повышение долговечности узла крепления черпаков дноуглубительного земснаряда / В. П. Булгаков, С. С. Уксусов, Л. А. Цапко // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2010. — № 2. — С. 7–8.

7. *Алиев А. А.* Борирование из паст / А. А. Алиев, А. Г. Ворошнин. — Астрахань: Изд-во АГТУ, 2006.

8. *Хрущев М. М.* Абразивное изнашивание металлов / М. М. Хрущев. — М.: Наука, 1970.

9. *Булгаков В. П.* Модель изнашивания трибосистемы при ударноабразивном воздействии / В. П. Булгаков, С. С. Уксусов, Л. А. Цапко // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 1. — С. 20–22.

10. *Ворошнин Л. Г.* Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. — Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001.

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

УДК 631.717

В. А. Куликов,
канд. техн. наук, доц.

НАБЛЮДАЕМОСТЬ ВЫБОРОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В СУДОСТРОЕНИИ

OBSERVABILITY SAMPLING DISTRIBUTIONS WHEN MEASURING IN THE MARINE ENGINEERING

Погрешность измерения при контроле деталей судового машиностроения имеет своим следствием возникновение ошибок контроля в виде неправильно принятых и неправильно забракованных деталей. В итоге неконтролируемо снижаются функциональные свойства изделий машиностроения, с одной стороны, и экономическая эффективность производства — с другой. Отсюда следует актуальность задачи оценки погрешности измерения и, в частности, ее случайной составляющей.

Случайная погрешность измерения величин с единственным значением оценивается по результатам многократных измерений в предположении неограниченной наблюдаемости размаха выборки. Однако наблюдаемость выборочного распределения ограничивается разрешающей способностью конкретной шкалы прибора, определяемой ценой деления. В итоге результаты статистической обработки содержат некоторую долю неопределенности. Образовался разрыв между теорией и практикой измерений в части оценки погрешности. Цифровые технологии моделирования распределений, случайных выборок из этих распределений по реальным шкалам и обработке результатов позволяют исследовать эти вопросы. Получены опытные вероятностные оценки ненаблюдаемых погрешностей измерения для разных шкал.

Measurement error in controlling parts of marine engineering has the effect of errors in the form of incorrectly accepted and incorrectly rejected parts. In the end an uncontrollably down the functional properties of engineering products on the one hand, and the economic efficiency of production, on the other hand. Here is the urgency of the task evaluation of measurement errors and, in particular, its random component.

Random error of measurement values with a single value is estimated based on the results of multiple measurements in the assumption of unlimited sampling scope observability. However, the sampling distribution is limited observability resolution specific scale device defined by divisions. In the end the aggregation results contain some uncertainty. There is a gap between theory and practice of measurement error estimates. Digital simulation technology distributions, random samples of these distributions on a real scale and enable you to explore these issues. Received advanced probabilistic estimation of unobserved measurement errors for different scales.

Ключевые слова: нормальное распределение, выборки, размах, погрешность измерения, цена деления шкалы прибора, разрешающая способность шкалы.

Key words: distribution, observation, samples, random error, division scale, resolving capacity.

ПОГРЕШНОСТЬ измерения деталей машин при контроле приводит к ошибкам контроля, снижающим в итоге качество изделий и эффективность производства. Не последнюю роль в формировании погрешности измерений должна играть цена деления шкалы прибора. Однако исследований на эту тему нет, а имеющиеся публикации, учитывая важность и сложность проблемы, носят постановочный характер (Общие методы и средства линейно-угловых измерений: учеб. пособие / под ред. Ф. В. Цидулко. — М.: Изд-во стандартов, 1981). Таким образом, проблема цены деления шкалы прибора должна решаться в связи с необходимостью выявления и оценки случайной составляющей погрешности измерения.

Случайная погрешность измерения оценивается по результатам многократных измерений величин с единственным значением, к которым относятся и размеры деталей машиностроения, в предположении неограниченной наблюдаемости зоны рассеяния выборочных значений [1] – [9]. Однако теоретический анализ формирования отсчета, учитывающий случайность размаха выборки и реальную цену деления шкалы, указывает на существование разрешающей способности шкалы как минимальной зоны рассеяния выборки, наблюдаемой на данной шкале [10]. По этой

причине результаты статистической обработки могут содержать неопределенность. Цифровые технологии моделирования распределений, случайных выборок из этих распределений по реальным шкалам и компьютерной обработки результатов позволяют исследовать эти вопросы, что невозможно сделать другими средствами.

Для исследования влияния цены деления шкалы прибора на наблюдаемость распределения и на оценку случайной погрешности измерения выполнен пересчет симулированных на компьютере, указанных в табл. 1, показаний 20 выборок объема $n = 5$ на конкретную шкалу с округлением до целых делений. Исследовано 30 шкал, на которых зона распределения k составляла от одного до 30 делений. Результаты «измерений», т.е. отдельные показания x_i и размах w, выражены в делениях конкретной текущей шкалы, а средние $\bar{x}$, среднеквадратические отклонения $s(\bar{x})$ и расчетные погрешности ε выражены в единицах (делениях) базовой шкалы, в качестве которой принята шкала, шесть делений которой укладывается в зоне распределения 6σ исходной совокупности. Программа MatLab воспроизводит выборки из нормальной совокупности с математическим ожиданием μ, равным нулю, и среднеквадратическим отклонением σ, равным единице. Значения x_i в выборках табл. 1 есть симуляция показаний прибора по базовой шкале с точностью до четвертого знака после запятой практически с неограниченной точностью.

Для каждой выборки рассчитаны:

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

– $s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i-1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}$ — среднеквадратическое отклонение оценки величины;

– $\varepsilon = s(\bar{x})\, t_{0,05}(n-1)$ — расчетная выборочная эмпирическая оценка доверительной границы случайной погрешности измерения [2];

– $t_{0,05}(n-1) = 2{,}776$ — по таблицам распределения Стьюдента при доверительной вероятности $P = 0{,}95$.

Таблица 1

Показания x_i с точным отсчетом

$x_i =$

Выборки с 1 по 14

0,6232 0,7990 0,9409 –0,9921 0,2120 0,2379 –1,0078 –0,7420 1,0823 –0,1315 0,3899 0,0880 –0,6355 –0,5596

0,0000 –0,3179 1,0950 –1,8740 0,4282 0,8956 0,7310 0,5779 0,0403 0,6771 0,5689 –0,2556 –0,3775 –0,2959

–1,6041 0,2573 –1,0565 1,4151 –0,8051 0,5287 0,2193 –0,9219 –2,1707 –0,0592 –1,0106 0,6145 0,5077 1,6924

0,2944 –1,3362 0,7143 1,6236 –0,6918 0,8580 1,2540 –1,5937 –1,4410 0,5711
–0,3999 0,6900 0,8156 0,7119

–0,4326 –1,6656 0,1253 0,2877 –1,1465 1,1909 1,1892 –0,0376 0,3273 0,1746
–0,1867 0,7258 –0,5883 2,1832

Выборки с 15 по 20

0,4437 –0,9499 0,7812 0,5690 –0,8217 –0,2656
–1,4751 –0,2340 0,1184 0,3148 1,4435 –0,3510
0,5913 –0,6436 0,3803 –1,0091 –0,0195 –0,0482
1,2902 0,6686 1,1908 –1,2025 –0,0198 –0,1567
–0,1364 0,1139 1,0668 0,0593 –0,0956 –0,8323

Цена деления шкалы, приведенная к базовой шкале, равна

$$c = \frac{6}{k},$$

где k — число делений шкалы в зоне 6σ как условный номер шкалы.

Увеличению k свыше шести соответствует уменьшение цены деления, а уменьшение k ниже шести — увеличению относительно базовой шкалы.

Для каждой шкалы по каждой выборке выполнены:

– пересчет показаний делением x_i на цену деления текущей шкалы c;

– округление полученных значений до целых делений текущей шкалы;

– расчет размаха выборки w как разности наибольшего и наименьшего показания по текущей шкале;

– расчет $\bar{x}$, $s(\bar{x})$ и ε по приведенным выражениям;

– расчет приведенной к базовой шкале погрешности ε1 умножением текущей ε на цену деления шкалы c.

Прежде всего, следует отметить случайность и неоднозначность доверительных границ ε, рассчитанных для каждой выборки по исходным показаниям с неограниченной точностью отсчета.

Графики рис. 1 и 2 демонстрируют характер изменения размаха w и расчетной погрешности ε1 в зависимости от цены деления шкалы для выборок № 4 и № 10 соответственно. Соответствующие графики остальных выборок не выходят за границы образовавшегося коридора.

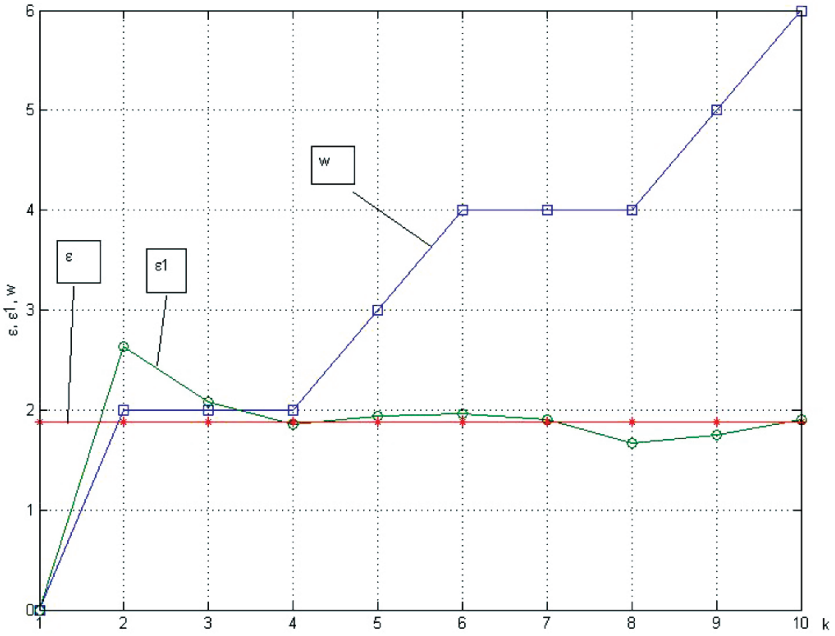


Рис. 1. График изменения погрешности измерения ε, ε1 и размаха w в зависимости от цены деления шкалы для выборки № 4

На рис. 3 представлен график зависимости, приведенной к базовой шкале размаха $w1$, от цены деления текущей шкалы — w, умноженного на c. График имеет характер переходного процесса.

На всех графиках можно выделить зону ненаблюдаемости, зону неопределенности и зону разрешения.

Не наблюдаются, т.е. при $w = 0$:

– распределение в одно деление шкалы с вероятностью 100 %;

– распределение в два деления в 14-ти выборках из 20;

– распределение в три деления в пяти выборках из 20;

– распределение в четыре деления в двух выборках из 20.

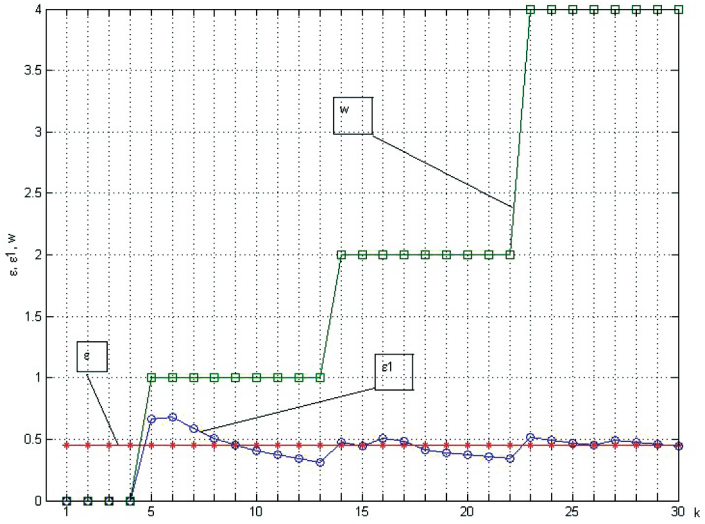


Рис. 2. График изменения погрешности измерения ε, ε1 и размаха *w* в зависимости от цены деления шкалы для выборки № 10

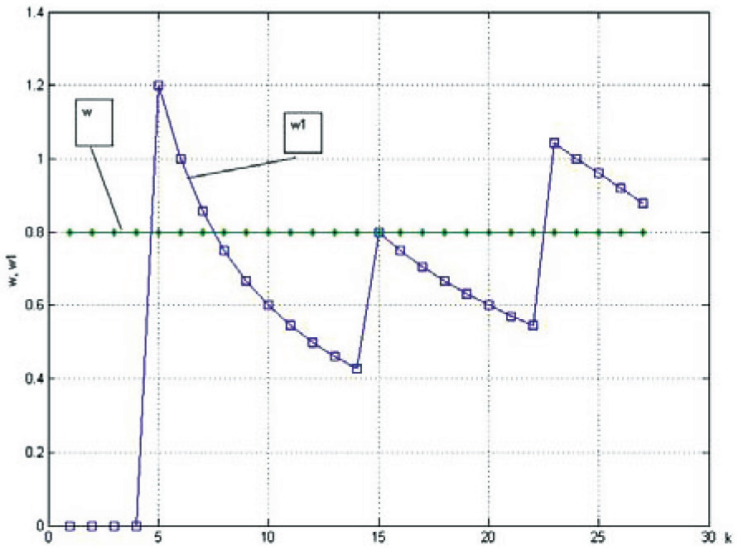


Рис. 3. График изменения приведенного к базовой шкале размаха *w*1 в зависимости от цены деления шкалы для выборки № 10

Таким образом, для распределений до четырех делений шкалы гарантированной наблюдаемости не существует. Интегральное распределение вероятностей этого граничного значения *k*, т.е. нарастающим итогом, приведено в табл. 2,

где $n = 41$ — общее число выборок по разным шкалам с $w = 0$;

m — число выборок с нулевым размахом на шкалах с распределением до k;

$P = P\{6\sigma < k\}$ — вероятность $\{6\sigma < k\}$.

Таблица 2

$P = P\{6\sigma < k\}$ при $w = 0$

k	2	3	4	5
$P = \frac{m}{n}$, %	49	83	95	100

С дальнейшим уменьшением цены деления шкалы за пределы $k = 4$ распределение наблюдается, т. е. $w \geq 1$. Однако наблюдаемость при w, равном единице или двум, еще не означает, как показывает моделирование, достижения достаточной точности разрешения по степени приближения расчетной погрешности ε по данной шкале k к значению той же величины, полученному по отсчетам с неограниченной точностью. В выборках, у которых точное расчетное значение ε превышает эталонное значение 0,9, на графиках наблюдается дополнительное гипертрофированное увеличение расчетной погрешности — исчезающий в дальнейшем всплеск как результат грубого округления на грубой шкале (выборки № 1, 2, 4, 8, 9, 14 и 15). Рис. 3 соответствует выборке № 10 ($w1$ — размах, приведенный к базовой шкале). Поэтому, соответствующие зоны значений k, признаком которых является равенство размаха w единице и двум, также нельзя назвать зоной разрешения. И только на шкалах $k = 5$ и более происходит выравнивание с точностью 10 – 15 % расчетных ε1 по шкале с ее точным значением ε. Следовательно, можно принять для разрешающей способности шкал, понимаемой как минимальное значение зоны рассеяния показаний, случайное распределение которой может наблюдаться на шкале при измерениях, значение в пять делений [10]. При $k = 5$ и более шкала дает разрешение, достаточное для расчета погрешности ε с указанной выше точностью. При $k < 5$ измерение попадает в зону неопределенности.

Возникает вопрос, что курс при измерениях может служить признаком зоны разрешения и зоны неопределенности и какие решения могут быть приняты в последнем случае. Полученные данные однозначно свидетельствуют, что признаком зоны разрешения является условие $w > 2$, которое соблюдается, начиная со шкалы $k = 5$ и более.

Признаком зоны неопределенности можно принять условие $w \leq 2$. Но этот признак встречается и в зоне разрешения вследствие случайности выборок. Поэтому признаки $w = 0$, $w = 1$ и $w = 2$ имеют случайное распределение в двумерном пространстве (шкалы — выборки).

Распределение $w = 0$ приведено ранее. Интегральное распределение вероятностей граничного значения k при условии $w = 1$ приведено в табл. 3, где $n = 59$ — общее число выборок по разным шкалам, у которых $w = 1$.

Таблица 3

$P = P\{6\sigma < k\}$ при $w = 1$

k	3	5	9	14
$P = \frac{m}{n}$, %	8	44	83	100

Выборки со значением $w = 2$ непрерывно наблюдаются на шкалах до $k = 22$. Интегральное распределение вероятностей этого признака приведено в табл. 4, где $n = 77$ — общее число выборок по разным шкалам, у которых $w = 2$.

Таблица 4

$P = P\{6\sigma < k\}$ при **$w = 2$**

k	3	7	14	23
$P = \frac{m}{n}$, %	1,3	38	75	100

Таким образом, при размахе до двух делений включительно в результатах измерения существует значительная неопределенность. С эмпирической вероятностью $P = 1{,}0$ при $w = 0$ зона рас-

пределения может достигать четырех делений, при $w = 1$ — 13 и при $w = 2$ — 22 делений шкалы, и эта граница может рассматриваться как доверительная для всех выборок.

Для устранения неопределенности погрешность по необходимости надо принимать по максимуму распределения (23 деления при $w = 2$), определяя таким образом ее доверительную границу. Если принимаемые по результатам измерений заключения по оценке погрешности оказываются неприемлемыми (например в случае оценки параметров разбраковки деталей при контроле), возникает необходимость коррекции измерений путем замены прибора на другой, с меньшей ценой деления, если в предыдущем измерительном эксперименте размах был меньше трех делений. Так, цена деления шкалы прибора вовлекается в оценку погрешности измерения и в процесс выбора средства измерения.

Таким образом, моделирование, позволяющее наблюдать за формированием числового значения отсчетов при измерениях, показывает, что:

1) для каждой шкалы существует граница наблюдаемости и разрешающей способности по отношению к измеряемому распределению; получены данные для выборок объема $n = 5$;

2) статистической обработке должно предшествовать устранение неопределенности из результатов измерений, обусловленной ограниченной точностью отсчета по шкале прибора, путем подбора средства измерения с достаточно малой ценой деления;

3) признаком неопределенности или ее отсутствия в измерениях является значение размаха в выборке.

Список литературы

1. ГОСТ Р 8.736-2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Дата введения: 2013.01.01.

2. *Сергеев А. Г.* Метрология, стандартизация, сертификация: учеб. пособие / А. Г. Сергеев, М. В. Латышев, В. В. Терегеря. — М.: Логос, 2003.

3. *Третьяк Л. Н.* Обработка результатов наблюдений: учеб. пособие / Л. Н. Третьяк. — Оренбург: Изд-во Оренбургского гос. ун-та, 2014.

4. *Мокров Ю. В.* Метрология, стандартизация и сертификация / Ю. В. Мокров. — М.: Международный ун-т природы, общ-ва и человека «Дубна», 2007.

5. *Данилевич С. Б.* Качество продукции и достоверность результатов контроля / С. Б. Данилевич, С. С. Колесников // Компетентность. — 2011. — № 2. — С. 20–22.

6. Цветков Э. И. Определение погрешностей и характеристик погрешностей с использованием комбинированных методов метрологического анализа / Э. И. Цветков // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. — 2008. — Т. 4. — №. 2. — С. 10–12.

7. *Правиков Ю. М.* Метрологическое обеспечение производства / Ю. М. Правиков, Г. Р. Муслина. — М.: Кнорус, 2011.

8. *Эйдельман Г. И.* Обработка результатов измерений: учеб. пособие / Г. И. Эйдельман, Н. А. Кириллова, Д. Ю. Орлов [и др.]. — Владимир: Изд-во ВГГУ, 2011.

9. *Радкевич Я. М.* Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов / Я. М. Радкевич, А. Г. Схиртладзе, Б. И. Лактионов. — М.: Мир горной книги, 2003.

10. *Куликов В. А.* Цена деления и разрешающая способность шкалы / В. А. Куликов, А. В. Куликов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2013. — Т. 56. — № 3. — С. 44–47.

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 629.12:629.5.037:621.33

А. В. Григорьев,
канд. техн. наук, доц.;

Ю. А. Кулагин,
соиск.

СУДОВЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЬНО-ДВИЖИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОЛЬЦЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ

THEORETICAL BASIS OF OPERATION MODES OF SHIP SHAFT GENERATOR PLANTS WITH FREQUENCY CONVERTERS AND SYNCHRONOUS COMPENSATORS

Судовые системы электродвижения (СЭД) находят все более широкое применение на судах различного назначения. Современное состояние науки и техники позволяет создать СЭД нового поколения с более высоким КПД, надежностью и минимальными массогабаритными показателями. В статье рассмотрены назначение и область применения СЭД, приведен анализ современных СЭД традиционной конструкции. Показана целесообразность применения в составе перспективных СЭД двигательно-движительных систем кольцевой конструкции (ДДС КК) на базе синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводниковых преобразователей частоты на базе активного выпрямителя и автономного инвертора. Разработаны и приведены схемотехнические решения СЭД с применением ДДС КК. Обоснована целесообразность применения ДДС КК в составе винторулевых колонок (ВРК) вспомогательных СЭД и подруливающих устройств. СЭД с ДДС КК имеют более высокие технико-экономические показатели и могут применяться на судах различного назначения.

Ship electric propulsion plants find more and more broad application in vessels of different function. The current state of science and equipment allows to create electric propulsion plants of new generation with higher efficiency, reliability and the minimum mass-dimensional indicators. In the article the purpose and the field of application of electric propulsion plants are considered, the analysis of modern electric propulsion plants of a traditional design is provided. Expediency of application, as a part of perspective electric propulsion plants, of rim driven propulsors on the basis of the synchronous electric motor with permanent magnets and semiconductor frequency converter on the basis of the active front end rectifier and the autonomous inverter is shown. Circuit solutions of electric propulsion plants with application of rim driven propulsors are developed and provided. Expediency of application of rim driven propulsors as a part of azimuth thrusters of auxiliary electric propulsion plants and tunnel thrusters is proved. Electric propulsion plants with rim driven propulsors have higher technical and economic indicators and can be applied in vessels of different function.

Ключевые слова: система электродвижения, гребной электродвигатель, синхронный электродвигатель, постоянные магниты, двигательно-движительная система кольцевой конструкции, кольцевой электродвигатель, полупроводниковый преобразователь частоты, винторулевая колонка, подруливающее устройство.

Key words: electric propulsion plant, propulsion motor, synchronous motor, permanent magnets, rim driven propulsor, rim motor, semiconductor frequency converter, azimuth thruster, tunnel thruster.

СУДОВЫЕ системы электродвижения (СЭД) предназначены для обеспечения движения судна в ходовых режимах эксплуатации [1], [2]. В настоящее время СЭД находят широкое применение на судах различных типов и назначения. По сравнению с традиционными пропульсивными комплексами на базе тепловых двигателей (дизелей и турбин) СЭД имеют ряд преимуществ, среди которых следует отметить:

– обеспечение высоких маневренных характеристик судна;

– более высокий КПД при работе на долевых нагрузках;

– более высокая перегрузочная способность ГЭД, что особенно важно при ходе судна во льдах;

– снижение вредных выбросов в атмосферу;

– возможность рационального размещения оборудования на судне с увеличением полезного объема и др.

В состав современных СЭД входит гребной электродвигатель (ГЭД), полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ), силовые трансформаторы, электрощитовое оборудование, системы автоматического управления и регулирования [3], [4]. В качестве ГЭД наиболее широкое применение нашли асинхронные и синхронные электродвигатели с электромагнитным возбуждением. В зависимости от типа движителя ГЭД могут выполняться средне- или малооборотными. В качестве ППЧ широкое применение нашли преобразователи со звеном постоянного тока на базе неуправляемых выпрямителей (НВ) и автономных инверторов (АИ) напряжения.

Система автоматического управления и регулирования СЭД обеспечивает пуск, плавное регулирование частоты вращения, торможение и, при необходимости, реверс ГЭД. В качестве движителей на судах с СЭД применяются гребные винты фиксированного шага или азимутально-управляемые винторулевые колонки (ВРК). При использовании в составе СЭД азимутальных ВРК управление курсом, торможение и реверс судна осуществляются с помощью разворота колонок. При этом исключается необходимость реверсирования винта. При использовании в составе СЭД механических ВРК ГЭД располагается в корпусе судна. Недостатком ВРК данного типа является ограничение максимальной мощности и момента, сравнительно низкий КПД и высокий уровень вибрации и шума.

В электрических ВРК ГЭД располагается в выносной гондоле. За счет прямой передачи вращающего момента на винт выше КПД колонок данного типа, ниже уровни вибрации и шума, выше максимально возможные мощности и момент по сравнению с механическими ВРК. Колонки данного типа широко используют на ледоколах и судах ледового класса.

Конструктивные исполнения современных СЭД с различными типами движителей [5] представлены на рис. 1.

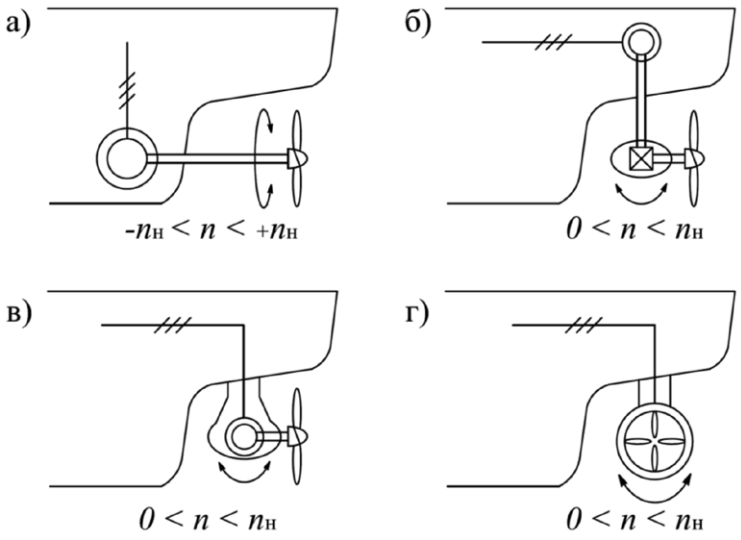


Рис. 1. Пропульсивные комплексы СЭД:
СЭД с прямой передачей вращающего момента на гребной винт (*а*);
СЭД с механической ВРК (*б*);
СЭД с электрической ВРК (*в*); СЭД на базе ДДС КК (*г*);
n — частота вращения ГЭД; $n_н$ — номинальная частота вращения ГЭД

Новый этап в развитии ВРК связан с созданием двигательно-движительных систем кольцевой конструкции (ДДС КК) на базе погружных электродвигателей. Принципиально новым элементом в ВРК, по сравнению с другими типами, является погружной кольцевой ГЭД, совмещенный с гребным винтом. Благодаря интеграции двигателя и движителя в единую конструкцию, в отличие от традиционных механических ВРК с *Z*-образной и *L*-образной передачами, в ДДС КК отсутствуют тяжелые валы и сложный, дорогостоящий, громоздкий конический редуктор. При этом следует отметить, что редукторы подобного типа мощностью свыше 400 – 500 кВт в настоящее время закупаются за рубежом, поскольку их серийное производство в России не освоено.

По сравнению с электрическими ВРК типа AZIPOD, корпус кольцевого ГЭД не препятствует потоку воды от гребного винта, поскольку последний находится внутри полого ротора. Использование электродвигателя данной конструкции повышает гидродинамический КПД пропульсивного комплекса, а также открывает возможность применения съемных технологичных лопастей, образующих бесступичный гребной винт типа «импеллер» повышенной эффективности в полости ротора кольцевого ГЭД.

В отличие от традиционных установок, в составе ДДС КК применяется синхронный электродвигатель с постоянными магнитами. Среди преимуществ таких электрических машин следует выделить следующие:

– минимальные массогабаритные показатели по сравнению с другими типами электродвигателей;

– высокая надежность, в том числе за счет большого воздушного зазора;

– высокий КПД благодаря отсутствию потерь на возбуждение;

– хорошие условия теплоотвода.

Внешний вид двигательно-движительной системы на базе кольцевого ГЭД представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид двигательно-движительной системы на базе кольцевого ГЭД

Типовая структурная схема СЭД с механической и электрической ВРК представлена на рис. 3. В состав СЭД входит ГЭД, ППЧ, трехобмоточный трансформатор, распределительный щит (РЩ). В качестве ГЭД, как правило, применяется асинхронный электродвигатель. ППЧ выполняется со звеном постоянного тока на базе НВ и АИ [6], [7]. ППЧ на базе шестипульсного НВ, собранного по схеме Ларионова, снижает качество электроэнергии в судовой сети. С целью улучшения гармонического состава напряжения судовой сети питание гребного электропривода осуществляется через трехобмоточные трансформаторы, что позволяет реализовать 12-пульсную схему выпрямления. Выпрямитель данного типа выполняется в виде двух трехфазных мостов Ларионова, включенных параллельно или последовательно. Схема ППЧ традиционного исполнения представлена на рис. 4, *а*.

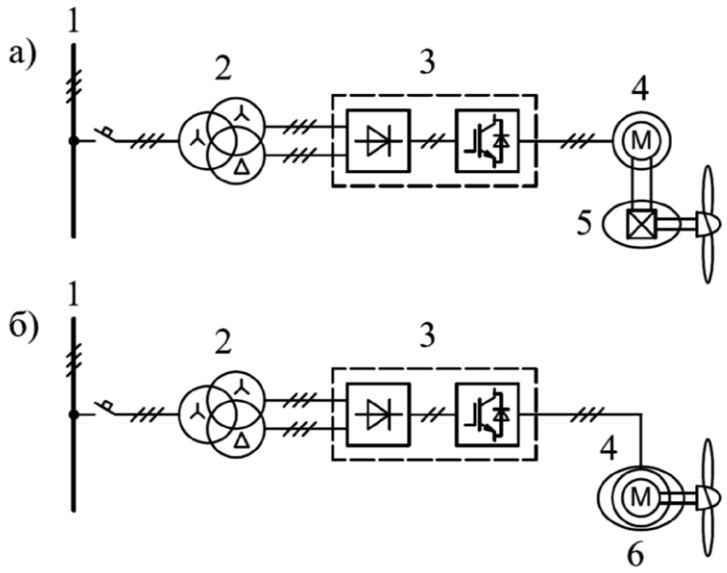


Рис. 3. СЭД традиционного исполнения:
СЭД с механической ВРК (*а*); СЭД с электрической ВРК (*б*):
1 — РЩ; *2* — трансформатор; *3* — ППЧ; *4* — ГЭД; *5*, *6* — механическая и электрическая ВРК

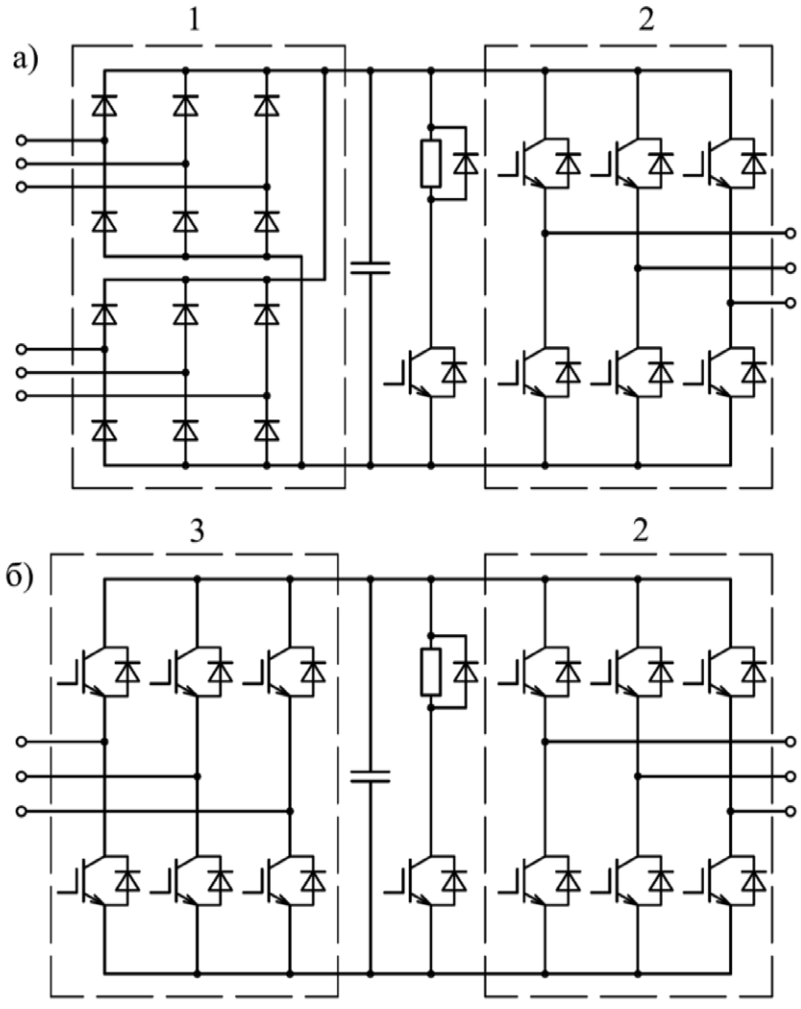


Рис. 4. Полупроводниковый преобразователь частоты:
необратимый ППЧ на базе 12-пульсного НВ (*а*); обратимый ППЧ на базе АВ (*б*):
1 — НВ; *2* — АИ; *3* — АВ

Устранить недостатки традиционных преобразователей возможно при использовании в составе ППЧ активных выпрямителей (АВ) (рис. 4, *б*). К достоинствам ППЧ на базе АВ следует отнести:

– минимальное влияние на качество электроэнергии в судовой сети;

– активная мощность может протекать в обоих направлениях, что позволяет дополнительно осуществлять рекуперативное торможение СЭД;

– минимальное потребление из судовой сети реактивной мощности, что позволяет работать с коэффициентом мощности, близким к единице;

– стабилизация напряжения в звене постоянного тока обеспечивает отсутствие влияния процессов, протекающих в судовой сети, на качество работы ГЭД.

Структурная схемы СЭД и подруливающих устройств нового поколения [8], [9] на базе ДДС КК и обратимых ППЧ на базе АВ представлена на рис. 5.

СЭД и ПУ на базе ДДС КК обладает следующими существенными преимуществами:

– минимальные виброшумовые характеристики;

– минимальные массогабаритные показатели;

– высокий суммарный КПД пропульсивного комплекса.

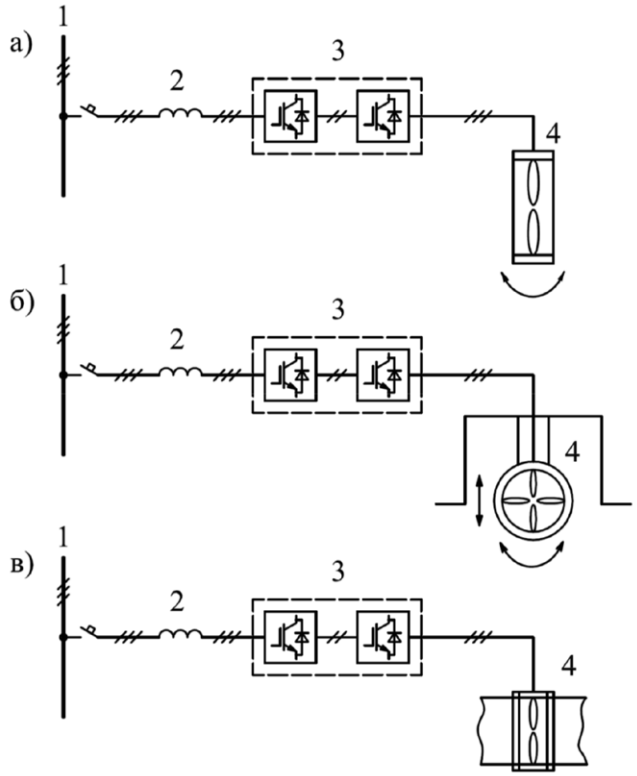


Рис. 5. СЭД и ПУ на базе ДДС КК:
СЭД на базе ДДС КК (*а*); СЭД с выдвижной ВРК на базе ДДС КК (*б*);
туннельное ПУ на базе ДДС КК (*в*);
1 — РЩ; *2* — реактор; *3* — ППЧ; *4* — кольцевой ГЭД

Благодаря значительному снижению массогабаритных показателей ДДС КК [10] целесообразно использовать в составе выдвижных ВРК вспомогательных СЭД и ПУ туннельного типа. СЭД с ДДС КК имеют более высокие технико-экономические показатели по сравнению с традиционными установками и могут применяться на современных судах различного назначения.

Список литературы

1. *Григорьев А. В.* Перспективная судовая единая электроэнергетическая установка / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3 (53). — С. 68–70.

2. *Григорьев А.* Судовой полупроводниковый преобразователь нового поколения / А. Григорьев, А. Колпаков, Ю. Кулагин [и др.] // Силовая электроника. — 2010. — № 4. — С. 47–50.

3. *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.

4. *Григорьев А. В.* Современные и перспективные судовые подруливающие устройства / А. В. Григорьев // Судостроение. — 2012. — № 1. — С. 42–45.

5. *Григорьев А. В.* Сравнительный анализ современных и перспективных судовых подруливающих устройств / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 4 (66). — С. 57–61.

6. *Григорьев А. В.* Частотно-регулируемый электропривод судового подруливающего устройства на базе обратимого преобразователя / А. В. Григорьев, Ю. А. Кулагин, Р. В. Митрофанов // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 1 (67). — С. 50–54.

7. *Григорьев А. В.* Судовая система электродвижения нового поколения / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2012. — № 2. — С. 38–40.

8. *Григорьев А. В.* Судовые подруливающие устройства нового поколения / А. В. Григорьев // Судостроение. — 2012. — № 3. — С. 52–55.

9. *Григорьев А. В.* Судовые подруливающие устройства / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2012. — № 5. — С. 32–34.

10. *Григорьев А. В.* Судовые системы электродвижения на базе кольцевых электродвигателей / А. В. Григорьев, Ю. А. Кулагин, С. М. Малышев // Морской вестник. Спецвыпуск. — 2013. — № 2 (11). — С. 60–61.

УДК 621.311, 537.67

Н. В. Родимов,
асп.;

А. С. Сероветников,
науч. сотр.;

В. П. Сивоконь,
д-р техн. наук, проф.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОРСКОЙ ПОРТОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ПРИПОЛЯРНОМ РАЙОНЕ

INVESTIGATION OF RELIABILITY FACTOR OF POWER SUPPLY OF PORT'S INFRASTRUCTURE IN SUBPOLAR AREAS

В полярных и приполярных районах велика вероятность деструктивного проявления геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), которые могут привести к коллапсу энергосистемы, как это было в Канаде в 1989 г. Следовательно, имеется необходимость мониторинга ГИТ и принятия мер по снижению его влияния на надёжность функционирования энергосистем. Для мониторинга ГИТ авторы используют вариации гармоник напряжения сети в сопоставлении с индексами магнитного поля Земли. На примере Петропавловск-Камчатского морского порта приводятся результаты наблюдений, в ходе которых зафиксировано увеличение уровня гармоник напряжения как следствие магнитной бури. Сопутствующим фактором проявления ГИТ является

насыщение сетей нелинейными потребителями и, как следствие, рост высших гармоник. В этой ситуации наиболее уязвимым для геомагнитно-индуцированных токов элементом является трансформатор. В связи с этим представлена оценка надёжности силового трансформатора как элемента энергетической системы, имеющей тенденцию насыщения нелинейными потребителями на фоне деструктивного проявления геомагнитно-индуцированных токов. Рассматриваются предложения, способные нейтрализовать деструктивное проявление геомагнитно-индуцированных токов в электротехнических системах.

In polar and subpolar regions high probability destructive manifestations of geomagnetic induced currents (GIC), which may lead to the collapse of the energy system, as it was in Canada in 1989. Therefore, there is need to monitor and GIC adoption of measures to reduce its impact on the reliability of the operation of power systems. For monitoring GIC authors use variations in voltage harmonics compared with the indices of the magnetic field of the Earth. For example, Petropavlovsk-Kamchatsky seaport, the results of observations, in which registered an increase in the level of voltage harmonics as a result of the magnetic storm. The concomitant factor of manifestation GIC is to saturate network nonlinear consumers and, consequently, the growth of the higher harmonics. In this situation, the most vulnerable to geomagnetic induced currents element is a transformer. In this connection, presents an assessment of reliability of the power transformer, as part of the energy system, tending to saturation nonlinear consumers against the background of the destructive manifestations of geomagnetic induced currents. Considering proposals are able to neutralize the destructive manifestation of geomagnetic induced currents in electrical systems.

Ключевые слова: геоиндуцированные токи, электроджет, чётные гармоники, качество электрической энергии, функция надёжности.

Key words: geo-induced currents, electrojet, even harmonics, electric energy quality, reliability function.

В СООТВЕТСТВИИ с приказом Минтранса России от 30.07.2010 № 167 ФГУП «Росморпорт» разработан проект документа «Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 г.» (далее — Стратегия). Проект Стратегии одобрен на совещании членов Морской коллегии при Правительстве Российской Федерации (протокол от 28.09.2012 № 2 (18)). Во втором квартале 2015 г. на заседании Правительства Российской Федерации запланировано обсуждение доработанного проекта Стратегии. В рамках Стратегии производится разработка проектной документации на реконструкцию морских терминалов, расположенных в различных морских портах [1], в том числе — Петропавловске-Камчатском.

Одним из основных положений Стратегии является обязательное повышение эффективности и надёжности электроснабжения предприятий морской отрасли при осуществлении их реконструкции, в связи с чем актуальным является вопрос повышения энергоэффективности и надёжности функционирования Петропавловск-Камчатского морского порта (далее — порт). Порт открыт для захода судов круглый год и способен принимать суда длиной до 200 м, шириной до 25 м и с осадкой до 9 м. Порт имеет 12 причалов. На рис. 1 показана схема акватории и территории морского порта г. Петропавловск-Камчатский. Цифрами обозначены пирсы.

В соответствии с государственной программой «Развитие судостроения на 2013 – 2030 гг.» в целях модернизации порта предполагается создание территории опережающего социально-экономического развития «Камчатка», в рамках которой предполагается построить современный транзитно-контейнерный порт-хаб и опорную береговую инфраструктуру в северо-восточной части Северного морского пути. Новые мощности увеличат пропускную способность до 500 тыс. судов в год. Порт сможет принимать суда любого класса, а круизные лайнеры смогут швартоваться у нового здания морского вокзала.

На сегодняшний день порт содержит комплекс сооружений, устройств для причаливания, разгрузки / погрузки судов, перегрузки грузов с одного вида судна на другой, складирования грузов, обработки грузов (сортировки, упаковки, заморозки и таможенного досмотра), а также рефрижераторные установки для хранения морепродуктов, снабжения судов и их ремонта, службы навигации и сопровождения судов, питания судов с берега при стоянке в порту. Обеспечение качественного функционирования всей инфраструктуры такого предприятия в большой степени зависит от качества электрической энергии, подаваемой на соответствующие объекты.

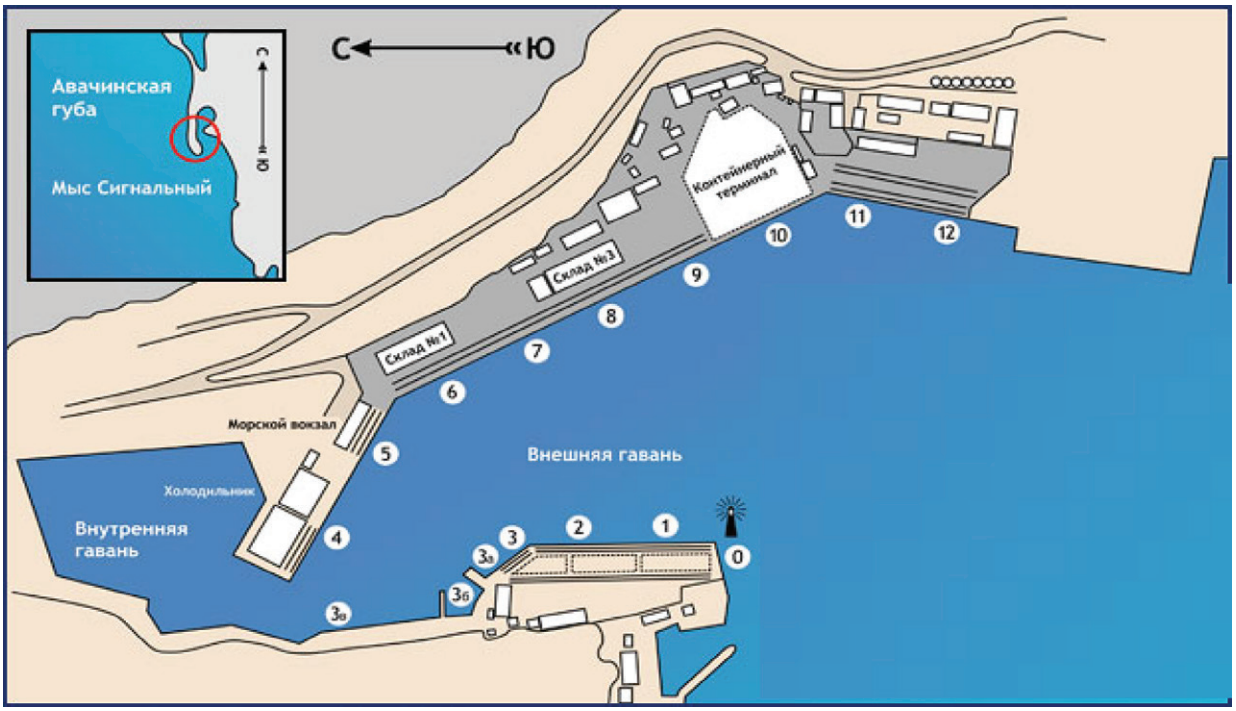


Рис. 1. Схема акватории и территории морского порта г. Петропавловск-Камчатский

Электроснабжение в порту, как правило, схоже с электроснабжением небольшого завода, но вместе с тем имеются свои особенности, связанные с большой протяженностью и разветвленностью электрических сетей, необходимых для его круглосуточного обеспечения. При этом энергетические решения, основанные на береговой инфраструктуре, часто включают всю цепочку, начиная с входящей подстанции, трансформаторов и преобразователей частот для приведения судовой электросети в соответствие с напряжением и частотой общей электросети при питании судна с берега. Такие решения позволяют осуществлять одновременное подключение нескольких судов с частотой 50 или 60 Гц независимо от частоты местной сети.

Согласно нормативным документам по электрификации береговых зданий и сооружений и Правилам эксплуатации электрооборудования на судах флота рыбной промышленности России при электроснабжении портовой инфраструктуры, а также при стоянке и электроснабжении судов в портах от береговых сетей следует руководствоваться действующими в данных портах инструкциями, правилами техники безопасности, правилами пожарной безопасности и правилами устройства электроустановок. Правилами предусмотрено, что при увеличении мощностей вопрос надёжности и качества электрической энергии является основополагающим.

Одним из параметров качества электроэнергии является гармонический состав тока и напряжения. Величина собственных гармонических составляющих обусловлена, как правило, нелинейными нагрузками в виде грузовых судовых и береговых механизмов, трансформаторов, различного рода преобразователей напряжения и преобразователей частот, подключаемых к электрическим сетям различного напряжения. Эти составляющие способны вызывать падение напряжения на полных сопротивлениях электрических сетей, что может приводить к дополнительным потерям мощности в береговых сетях морского порта.

Наряду с этими деструктивными факторами имеются высшие гармоники, обусловленные геомагнитно-индуцированными токами (ГИТ). ГИТ — природное явление, обусловленное солнечно-земными связями. Взаимодействие магнитосферы Земли с потоком солнечного ветра приводит к вариациям естественной ионосферной токовой структуры — электроджета. В результате по наземным протяженным токопроводящим системам начинают циркулировать токи с частотой ниже 1 Гц. Цепью протекания индуцированных токов являются заземленные нейтрали силовых трансформаторов, что

приводит к подмагничиванию сердечника и сдвигу рабочей точки в область нелинейного режима. При этом в спектре тока и напряжения увеличиваются составляющие высших порядков. В настоящее время получено большое количество сведений об авариях и отказах электроэнергетических систем, вызванных данным явлением [2]. Предположительно, более половины отключений линий электропередач и ложного срабатывания релейной защиты и автоматики в системах электроснабжения, причины которых остались невыясненными, могли быть обусловлены проявлением ГИТ [3].

Авторами разработан способ мониторинга ГИТ [4], основанный на анализе вариаций высших гармоник напряжения. На основании решения Совета по науке и инновациям при Губернаторе Камчатского края организованы наблюдения на различных участках электросети Камчатского края, что позволило успешно апробировать разработанный подход и показать связь уровня гармоник напряжения с вариациями магнитного поля Земли [5]. Моделирование силового трансформатора в условиях протекания ГИТ в его обмотках [6] показало, что гармоники напряжения четных порядков могут использоваться в качестве индикатора ГИТ. В качестве примера использования разработанного подхода приведём анализ проявления возмущений магнитного поля Земли в электросети Камчатки в период 16 – 18 марта 2015 г. В этот период произошла геомагнитная буря, которая начала развиваться 17 марта в 16 ч по мировому времени (*UTC*) и продолжалась вплоть до 18 марта, до 11 ч *UTC*. Особенностью данного события является то, что максимум возмущения магнитного поля Земли пришелся на ночь, когда нагрузка минимальна, а пространственное положение электроджета способствует максимальному его проявлению в электрических сетях Камчатки.

Вначале для оценки состояния магнитного поля Земли используем вариации индекса магнитного поля *Dst*. Сопоставим вариации индекса с уровнем четных гармоник, рис. 2.



Рис. 2. Сопоставление *Dst* и уровня чётных гармоник сети

Из рис. 2 видно совпадение в поведении уровня гармоник и индекса *Dst* в момент начала магнитной бури. Для детализации процессов сопоставим уровень гармоник с вариациями горизонтальной компоненты магнитного поля Земли *H*, поскольку данные по гармоникам имеют минутное усреднение, а *Dst* — часовое (рис. 3).

Как видно из рис. 3, графики отражают ту же связь, что и сравнение с *Dst*, но взаимосвязь процессов прослеживается и на более поздних стадиях геомагнитной бури. Таким образом, чётные гармоники можно рассматривать в качестве индикатора проявления геомагнитно-индуцированных токов в энергетических системах.



Рис. 3. Сопоставления вариаций горизонтальной компоненты магнитного поля Земли и уровня чётных гармоник напряжения сети

Из приведённого анализа следует, что негативное воздействие ГИТ на элементы систем электроснабжения необходимо учитывать при проведении проектирования и реконструкции терминалов порта как неотъемлемый элемент совершенствования системы питания морских судов с берега, оборудование которых чувствительно к проявлению высших гармоник сети.

Таким образом, надёжность электроэнергетических систем порта зависит от внешних (в данном случае геомагнитно-индуцированных) токов и внутренних возмущающих факторов. Основными источниками питания инфраструктуры порта являются трансформаторные подстанции, одновременно они же являются главным объектом проявления ГИТ. Большинство отключений потребителей, а соответственно, и сокращение срока службы трансформаторов, происходит в результате дополнительного нагрева изоляции обмоток из-за дополнительных потерь активной мощности, возникающих из-за протекания токов высших гармоник, величина которых, как уже было показано, зависит, в том числе, от ГИТ [6].

По рекомендациям Российского национального комитета по вопросам электроэнергетики СИГРЭ для определения срока службы трансформатора необходимо рассчитывать температуру наиболее нагретой точки обмотки трансформатора. Таким образом, для расчёта надёжности трансформатора необходимо определять дополнительный нагрев изоляции трансформатора $\Delta\tau$, для чего следует учитывать дополнительные потери мощности при протекании токов высших гармоник [7]:

$$\Delta P_{\nu} = 3\sum_{\nu=2}^{n} I_{\nu}^{2} R_{k1} k_{\nu m}, \qquad (1)$$

где I_{ν} — ток ν-й гармоники, проходящей через трансформатор; R_{k1} — сопротивление короткого замыкания трансформатора при частоте 50 Гц; $k_{\nu m}$ — коэффициент увеличения сопротивления при коротком замыкании для высших гармоник.

Кроме того, на частотах высших гармоник возникают потери, вызываемые вихревыми токами,

$$\Delta P_{0\nu} = 0{,}05\Delta P_{\nu}\nu^{2}. \qquad (2)$$

Таким образом, полные дополнительные потери, возникающие из-за протекания токов высших гармоник, составляют

$$\Delta P_{\text{полн }v} = \sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{\nu}(1 + 0{,}05\nu^2). \tag{3}$$

Полные потери мощности, выделяемые в тепло, обусловленные токами высших гармоник на основной частоте составляют

$$\Delta P_{\text{сумм}} = \Delta P_1 + \Delta P_{\text{полн }v}, \tag{4}$$

где ΔP_1 — потери тепловой мощности на основной частоте трансформатора.

Из изложенного следует, что температура $\theta_{\text{ТО}}$, превышающая номинальную температуру обмотки низкого напряжения трансформатора $\theta_{\text{ном ТО}}$, будет зависеть от степени суммарных активных потерь мощности трансформатора

$$\theta_{\text{ТО}} \equiv \Delta P^n, \tag{5}$$

где ΔP — суммарные потери мощности в трансформаторе; n — показатель степени.

Номинальное превышение температуры для трансформаторов типа ТМ, в соответствии с ГОСТ 11677-85, должно составлять $\theta_{\text{ном ТО}} \le 60$ °С.

Также соотношение температуры масла $\theta_{\text{Н}}$ для масленых трансформаторов, превышающая температуру охлаждающей среды $\theta_{\text{ном Н}}$, будет выглядеть следующим образом

$$\theta_{\text{Н}} \equiv \Delta P^m,$$

где m — показатель степени.

Превышение температуры, в соответствии с ГОСТ 11677-85, должно составлять $\theta_{\text{ном Н}} \le 75$ °С.

Дополнительный нагрев обмотки трансформатора в несинусоидальном режиме $\Delta\tau$ можно определить следующим образом [8]:

$$\Delta\tau = A\left(\frac{(0{,}01k_{2U})}{U_k^2} + \frac{1{,}291}{U_k^2}\sum_{\nu=2}^{n}\frac{1+0{,}05\nu^2}{\nu\sqrt{\nu}}k_{U(\nu)}^2\right), \tag{6}$$

где $A = \dfrac{m\theta_{\text{Н}}P_{\text{КЗ}}}{P_{\text{КЗ}} + P_{\text{ХХ}}} + n\theta_{\text{ТО}}$ — постоянная, зависящая от конструктивных, магнитных и электромагнитных параметров трансформатора; $k_{2U} = \dfrac{U_2}{U_{\text{ном}}}$ — коэффициент обратной последовательности напряжений, равный отношению напряжения обратной последовательности U_2 к номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$; $k_{U(\nu)} = \dfrac{U_\nu}{U_{\text{ном}}}$ — относительное значение напряжения ν-й гармоники; U_k — напряжение короткого замыкания; $P_{\text{КЗ}}$ — потеря мощности при коротком замыкании; $P_{\text{ХХ}}$ — потеря мощности холостого хода; m и n — параметры, характеризующие нелинейность и используемые для определения зависимости превышения температуры верхних слоев масла над температурой охлаждающей среды и зависимости превышения температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой верхних слоев масла (в соответствии с ГОСТ 14209-97).

Для анализа надёжности трансформаторов типа ТМ при влиянии токов высших гармоник может быть принят нормальный закон распределения времени безотказной работы. Тогда функция надёжности будет иметь вид [8]

$$R(t) = \frac{\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}}\displaystyle\int_{\frac{t-m_V}{\sigma_V}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}}dx}{\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}}\displaystyle\int_{\frac{m_V}{\sigma_V}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}}dx} = \frac{0{,}5 + \Phi\left(\dfrac{m_V - t}{\sigma_V}\right)}{0{,}5 + \Phi\left(\dfrac{m_V}{\sigma_V}\right)}, \tag{7}$$

где $m_V = Be^{-\alpha m_{\Delta\tau}+\frac{\alpha^2}{2}\sigma^2_{\Delta\tau}}$ — математическое ожидание срока службы трансформатора; $\sigma_V = m_V\sqrt{e^{\alpha^2\sigma^2_{\Delta\tau}-1}}$ — среднее квадратичное отклонение срока службы трансформатора; $\sigma_{\Delta\tau}$ — среднее квадратичное отклонение дополнительного нагрева трансформатора; $m_{\Delta\tau}$ — математическое ожидание дополнительного нагрева трансформатора; B — постоянная срока службы трансформатора, зависящая от условий окружающей среды; $\alpha = 0{,}1155\ °C^{-1}$ — известный коэффициент старения изоляции для трансформаторов; $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}dt}$ — интеграл вероятностей.

Все выражения получены при допущении нормального закона распределения температуры $\Delta\tau$.

Из изложенного следует, что при расчёте показателей надёжности для трансформаторов типа ТМ, применяемых в порту, необходимо пользоваться такими данными как: тепловые потери при коротком замыкании $\Delta P_{КЗ}$, потери холостого хода ΔP_{XX}, напряжение короткого замыкания $U_{КЗ}$, номинальный ток $I_{ном}$ и номинальное напряжение трансформатора $U_{ном}$, коэффициент несинусоидальности напряжения для ν-й гармонической составляющей напряжения $K_U = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=2}^{n} U_\nu^2}}{U_1}$.

Расчёты функции надёжности $R(t)$ для трансформатора типа ТМ-360/10, представленный в таблице, показал, что существенное снижение надёжности будет наблюдаться при увеличении коэффициента несинусоидальности. Даже если нагрузка трансформатора ТМ не превышает номинальную, влияние несинусоидальности напряжения будет проявляться всё больше [9].

Величина $R(t)$ для разных значений K_U

Коэффициент несинусоидальности K_U, %	7,38	8	8,307	8,66	8,92
Функция надёжности $R(t)$	0,942	0,836	0,712	0,458	0,245

Проведённые в трёх населенных пунктах Камчатки наблюдения (Петропавловск-Камчатский, Паратунка, Усть-Большерецк) показали, что только в Усть-Большерецке коэффициент несинусоидальности меньше максимального из таблицы. Следовательно, с учётом дальнейшего насыщения сетей нелинейными потребителями, проблема ГИТ становится всё более актуальной. К сожалению, в России до настоящего времени отсутствуют рекомендации по повышению надежности функционирования систем электроснабжения при геомагнитных бурях, как, например, в документе С-15 «Действия при солнечных магнитных возмущениях, влияющих на электроэнергетические системы» [10], разработанном Координационным советом северо-восточной электроэнергетической системы США после геомагнитной бури 1989 г.

Выводы

Для повышения надёжности энергоснабжения порта Петропавловск-Камчатский необходимо принятие мер по предотвращению деструктивного проявления ГИТ, которые можно разделить на превентивные, закладываемые при проектировании энергетических систем, и ситуативные, принимающиеся исходя из геофизической обстановки.

В качестве превентивных мер можно использовать рекомендации Европейского комитета по стандартизации (European committee for electrotechnical standardization), заключающиеся в выборе мощности трансформатора с учётом уровня высших гармоник.

В качестве ситуативных мер можно использовать, например, оперативные переключения нагрузки, исходя из сочетания складывающейся геофизической обстановки и уровня высших гармоник, информацию о которой можно получить из предложенного подхода. В отличие от используемых в мировой практике способов мониторинга ГИТ, наш подход основан на применении более доступного и простого оборудования, включение которого возможно непосредственно у потребителя.

Список литературы

1. *Железкова П. Е.* Грузооборот портов Северо-Западного региона России на Балтийском море / П. Е. Железкова, В. Г. Никифоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 133–138.

2. *Elias A. G.* Strong geomagnetic disturbances and induced currents on earth surface / A. G. Elias, V. M. Silberglei // Progress in electromagnetics research letter. — 2008. — Vol. 1. — Pp. 139–148.

3. *Скопинцев В. А.* Влияние космических факторов на повреждаемость в электрических сетях / В. А. Скопинцев, Д. В. Маркитанов // Энергетик. — 2012. — № 10. — С. 8–11.

4. *Сивоконь В. П.* Высшие гармоники как индикатор геомагнитно-индуцированных токов / В. П. Сивоконь, А. С. Сероветников, А. В. Писарев // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2011. — № 3. — С. 44–51.

5. *Сивоконь В. П.* Геомагнитно-индуцированные токи в электрических сетях Камчатки / В. П. Сивоконь, А. С. Сероветников // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2013. — № 3. — С. 19–22.

6. *Сероветников А. С.* Вариации спектра тока трансформатора, подверженного воздействию геомагнитно-индуцированных токов / А. С. Сероветников, В. П. Сивоконь // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2015. — № 1. — С. 18–21.

7. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С. Ю. Долингер, А. Г. Лютаревич, В. Н. Горюнови [др.] // Омский научный вестник. — 2013. — № 2 (120). — С 178–183.

8. *Черепанов А. В.* Управление качеством электроэнергии и энергоэффективностью в системах электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / А. В. Черепанов. — Иркутский гос. ун-т путей сообщения. — Иркутск, 2015.

9. *Жежеленко И. В.* Расчёт надёжности силовых трансформаторов при наличии несинусоидальности и несимметрии напряжений / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, А. В. Горпинич // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Серия: Технические науки. — 2004. — № 14. — С. 255–260.

10. Document C-15 «Procedures for Solar Magnetic Diturbances which Affect Electric Power Sytems» revised January 11 2007: Northeast Power Coordination Council, New York, NY.

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

УДК 629.123

Р. С. Федюк,
ст. преп.;

Ю. Ю. Ильинский,
нач. учебной части военно-морского отдела;

Д. И. Ибрагимов,
ст. преп.

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА КОРПУС СУДНА

DEVELOPMENT OF POWER SUPPLY DEVICES FOR LIMITATIONS SHORT CIRCUIT ON THE SHIP'S HULL

В статье проанализированы причины и последствия однофазных замыканий на землю (на корпус судна). При всем разнообразии устройств для ограничения тока однофазного замыкания на землю выявлено, что наиболее эффективными являются дугогасящие реакторы, имеющие различные схемы включения. Большое значение в данном случае имеет измерение емкости сети, ряд вариантов измерения емкости приведен в работе. Подробно рассмотрено устройство для ограничения тока однофазного короткого замыкания, разработанное в Дальневосточном федеральном университете под руководством д-ра техн. наук Г. Е. Кувшинова. Рассмотрен источник питания данного устройства, который осуществляет преобразование переменного тока в постоянный и реализуется за счет использования полупроводниковых приборов (транзисторов и диодов) в мостовой схеме. Технический результат применения данного источника питания заключается в снижении массогабаритных показателей (по сравнению с ближайшими аналогами) для подключения управляемого выпрямителя напряжения к источнику напряжения переменного тока, в том числе массы и размера батареи конденсаторов токоограничивающих цепей, и повышении динамических показателей стадии неуправляемого заряда выходного конденсатора управляемого выпрямителя напряжения.

Article shows the reasons for and consequences of the single-phase ground fault (in the hull). For all the variety of devices to limit the current single-phase ground fault, it found that the most effective are Peterson coils having different switching circuits. Of great importance in this case is measuring the capacity of the network, is pleased options capacitance measurement is given in. A closer look at the device for limiting the current single-phase short circuit, developed in the Far Eastern Federal University under the direction of Doctor of Science G. E. Kuvshinov. Considered the power supply of the device that converts AC to DC, and is implemented through the use of semiconductor devices (transistors and diodes) in a bridge circuit. The technical result of application of this power supply is to reduce the weight and size parameters (compared to the closest analogues) for connecting the voltage controlled rectifier to the voltage source AC, including mass and size of the capacitor bank current limiting circuit, and improving the dynamic performance of the charge stage unmanaged the output capacitor voltage controlled rectifier.

Ключевые слова: короткое замыкание, корпус корабля, дугогасящий реактор, источник питания.
Key words: short-circuit, the ship's hull, arc suppression reactors, power supply.

Введение

Однофазные замыкания на землю являются преобладающим видом повреждений в электрических сетях среднего напряжения 6 – 10 кВ (75 – 90 % от общего числа электрических повреждений), которые сопровождаются электрической дугой, способной вызвать пожар и разрушить проводники тока в месте короткого замыкания (КЗ), из-за чего однофазное КЗ может перейти в двух- или трёхфазное [1], [2].

Подавляющее большинство нарушений нормальной работы сетей с изолированной нейтралью связано с локальным повреждением изоляции. В такой сети, даже при высоком сопротивле-

нии изоляции, через место КЗ может проходить значительный ток. Это происходит из-за большого значения суммарной ёмкости электрической сети относительно поверхности земли, и ток однофазного КЗ тем больше, чем больше значение указанной суммарной ёмкости и выше напряжение в электрической сети [3], [4].

Для обеспечения максимально возможной надежности работы сети необходимо, чтобы ток замыкания был настолько мал, чтобы в течение достаточно длительного времени, необходимого для поиска и устранения повреждения, можно было бы обойтись без отключения потребителей. Согласно правилам технической эксплуатации электростанций и сетей, допустимыми токами замыкания, не требующими немедленного отключения таких поврежденных присоединений, считаются токи: в воздушных сетях 6 – 20 кВ на железобетонных или металлических опорах и во всех сетях 35 кВ — не более 10 А; в воздушных сетях, не имеющих железобетонных или металлических опор, при напряжении 6 кВ — не более 30 А, при напряжении 10 кВ — не более 20 А, при напряжении 15 – 20 кВ — не более 15 А. Если токи превышают приведенные значения, требуется компенсация емкостного тока замыкания на землю.

Действующее значение тока КЗ быстро снижается до небольшого установившегося значения, если заземлить нейтральную точку электрической сети на землю через дугогасящий реактор (ДР), индуктивное сопротивление которого на частоте источника напряжения, питающего электрическую сеть, равно сопротивлению на этой частоте суммарной ёмкости всех трёх фаз электрической сети по отношению к земле [5], [6].

Эта ёмкость часто изменяется не только при возникновении однофазного замыкания, но и при изменении конфигурации сети, а также вследствие изменения длины какой-либо линии при манипуляции во время эксплуатации или под воздействием температуры, обледенения, колебаний частоты и по другим причинам. Поэтому индуктивность дугогасящего реактора необходимо постоянно поддерживать на значении, резонирующем с емкостью сети. Из-за этого реактор состоит из двух частей: регулируемого силового элемента и блока управления. Последний воздействует на силовой элемент так, чтобы его индуктивность изменялась вслед за изменением суммарной ёмкости электрической сети [7], [8].

Задача настоящей статьи состоит в том, чтобы разработать источник питания для устройства для ограничения тока однофазного КЗ на землю в электрической сети.

Основная часть

В Дальневосточном федеральном университете под руководством д-ра техн. наук, проф. Г. Е. Кувшинова было изобретено устройство для ограничения тока однофазного замыкания на землю (на корпус судна) [8], [9]. Электрическая структурная схема устройства *1* для ограничения тока однофазного КЗ на землю в электрической сети с незаземлённой нейтралью *2* показана на рис. 1. Блок *3* представляет собой источник трёхфазного напряжения. Блок *9* конденсаторов с ёмкостями имитирует ёмкостную проводимость фаз, по отношению к земле. Резистор *R* моделирует сопротивление цепи однофазного короткого замыкания на землю для фазы С. Индуктивным компонентом устройства *1* является блок *4*, в состав которого входит блок *6* — электрический фильтр, блок *7* — умножитель, блок *8* — управляемый напряжением источник тока, блок *5* — командный блок.

При возникновении КЗ на нейтрали электрической сети появляется напряжение, которое поступает на вход электрического фильтра *6*. Принципиальная схема фильтра, выполненного в виде фильтра нижних частот, показана на рис. 2.

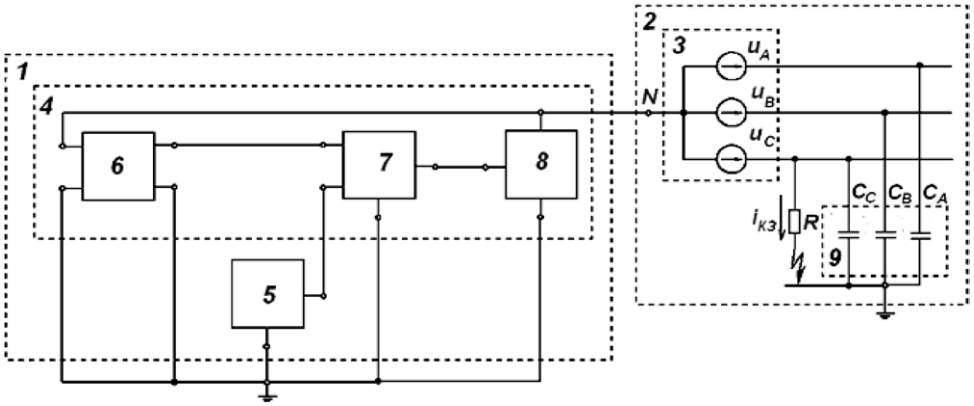


Рис. 1. Электрическая структурная схема устройства
для ограничения тока однофазного замыкания

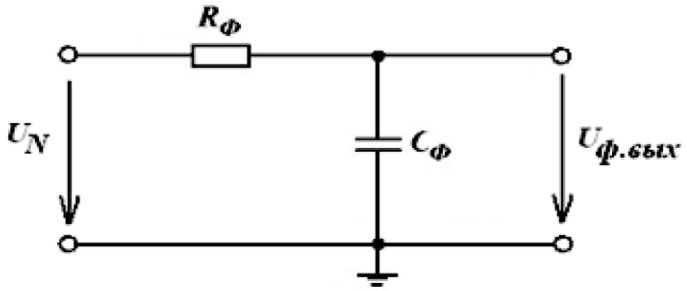


Рис. 2. Фильтр нижних частот

Передаточная функция фильтра, показанного на рис. 2, имеет вид

$$W_{RC}(S) = \frac{U_{\text{ф.вых}}(s)}{U_N(s)} = \frac{1}{1+\tau s}, \tag{1}$$

где $\tau = R_ф N_ф$ — постоянная времени фильтра. Эта постоянная времени во много раз превосходит величину, обратную круговой частоте ω_1 источника *3*. Поэтому при круговых частотах, удовлетворяющих условию $\omega \geq \omega_1$, амплитудная и фазовая частотные характеристики фильтра *6*, которые получаются после подстановки $s = j\omega_1$ в передаточную функцию (1), имеют малые отличия от аналогичных характеристик идеального интегратора с передаточной функцией $1/(\tau s)$.

Выходное напряжение фильтра, представленное в комплексной форме,

$$U_{\text{ф.вых}} = \frac{\bar{U}_N}{1+j\omega_1\tau}, \tag{2}$$

где $\bar{U}_N$ — напряжение на нейтрали; ω_1 — круговая частота.

Мгновенное значение этого напряжения подводится ко второму входу умножителя *7*, на первый входной зажим которого подаётся требуемое значение передаточной проводимости $G_{\text{УИТ}}$, управляемого напряжением источника тока *8*. При этом выходной ток источника тока описывается формулой

$$\bar{I}_{\text{УИТ}} = U_{\text{ф.вых}} \cdot G_{\text{УИТ}} = \frac{U_N G_{\text{УИТ}}}{1+J\omega_1\tau}. \tag{3}$$

Из этой формулы находится отношение $\bar{U}_N$ к $\bar{I}_{\text{УИТ}}$, которое определяет комплексное сопротивление, эквивалентное индуктивному компоненту *4*:

$$\underline{Z}_{\text{ИК}} = \frac{1}{G_{\text{УИТ}}} + j\frac{\tau\,\omega_1}{G_{\text{УИТ}}}. \tag{4}$$

Мнимая составляющая $\underline{Z}_{ИК}$ эквивалентна индуктивному сопротивлению индуктивного компонента и равна

$$X_{ИК} = \frac{\tau\omega_1}{G_{УИТ}}. \quad (5)$$

Индуктивность индуктивного компонента

$$L_{ИК} = \frac{\tau}{G_{УИТ}}. \quad (6)$$

Действительная составляющая $\underline{Z}_{ИК}$ эквивалентна активному сопротивлению индуктивного компонента и равна

$$R_{ИК} = \frac{1}{G_{УИТ}}. \quad (7)$$

Добротность индуктивного компонента

$$q_{ИК} = \frac{X_{ИК}}{R_{ИК}} = \frac{\omega_1 L_{ИК}}{R_{ИК}} = \omega_1\tau. \quad (8)$$

Добротность $q_{ИК}$ индуктивного компонента значительно превосходит добротность дугогасящего реактора, так как постоянная времени τ может достигать 1 с и более. Следовательно, добротность индуктивного компонента в шесть раз и более может превосходить добротность дугогасящего реактора.

При замене индуктивного компонента *4* эквивалентным комплексным сопротивлением $\underline{Z}_{ИК}$, состоящим из сопротивления $R_{ИК}$ и индуктивности $L_{ИК}$, получается схема замещения (рис. 3) системы с заземлением нейтрали через индуктивный компонент. Параллельно индуктивному компоненту включен конденсатор с суммарной ёмкостью трёх фаз относительно заземления ($3C$). Цепь, состоящая из двух параллельно включённых ветвей ($3C$ и $\underline{Z}_{ИК}$), может быть настроена на резонанс токов.

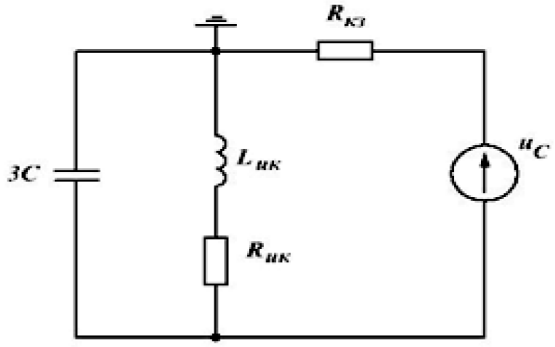


Рис. 3. Схема замещения системы с заземлением нейтрали через индуктивный компонент

Тогда сумма токов этих ветвей становится минимальной. Такой резонанс достигается при равенстве нулю реактивной проводимости указанного параллельного соединения, т. е. должно выполняться условие $X_{ИК} = X_{C\Sigma}$, из которого находится формула для требуемого значения передаточной проводимости $G_{УИТ}$ управляемого напряжением источника тока *8*

$$G_{УИТ} = \tau\omega_1^2 C_\Sigma, \quad (9)$$

где C_Σ — суммарная ёмкость фаз относительно земли.

Перед подключением индуктивного компонента *4* к электрической сети *2* (см. рис. 1), необходимо с командного блока *5* задать значение передаточной проводимости $G_{УИТ}$, которое зависит, в соответствии формулой (9), от суммарной ёмкости C_Σ всех фаз относительно земли. Соответ-

ствующий сигнал о значении $G_{УИТ}$ с выходного зажима командного блока *5* поступает на первый входной зажим умножителя *7*.

Используя электронный конвертер-источник тока, можно сформировать ток на входе, обозначенном мостовым выпрямителем как синусоидальный и находящийся в фазе с входным напряжением.

Выбор электронного преобразователя базируется на следующих положениях:

– в основном электрическая изоляция между входом нагрузки и выходом силовой электронной системы не нужна (например, в двигателях постоянного и переменного тока) или может быть выполнена при условии применения преобразователя второго уровня — как в переключателе режима силовых устройств постоянного тока;

– во многих случаях желательно стабилизировать напряжение постоянного тока U_d немного с запасом от максимального входного напряжения переменного тока;

– входной ток должен быть наиболее близким к идеальному (как при коэффициенте мощности, равном единице) так, чтобы интерфейс силовой электроники имитировал резистор, представленный источником нагрузки. Это также подразумевает, что электрический ток всегда однонаправленный — из источника нагрузки в электрооборудование;

– цена, потери и размеры источника тока должны быть минимизированы [10].

Базируясь на этих правилах, изоляция линейно-частотного преобразователя исключена. Также, если это приемлемо, то $U_d > U_s$, где U_s — пик переменного входного напряжения. Таким образом, очевидным выбором для источника тока является повышающий DC-DC-преобразователь.

Этот преобразователь представлен на рис. 4, где конденсатор C_d используется для минимизации пульсаций U_d и удовлетворения требований накопления энергии систем силовой электроники. Постоянный ток I_{load} представляет собой мощность, подаваемую в остальной части системы (высокочастотный компонент в выходном токе фактически отфильтровывается C_d). Для простоты внутренняя индуктивность L_s источника представлена на данном рисунке.

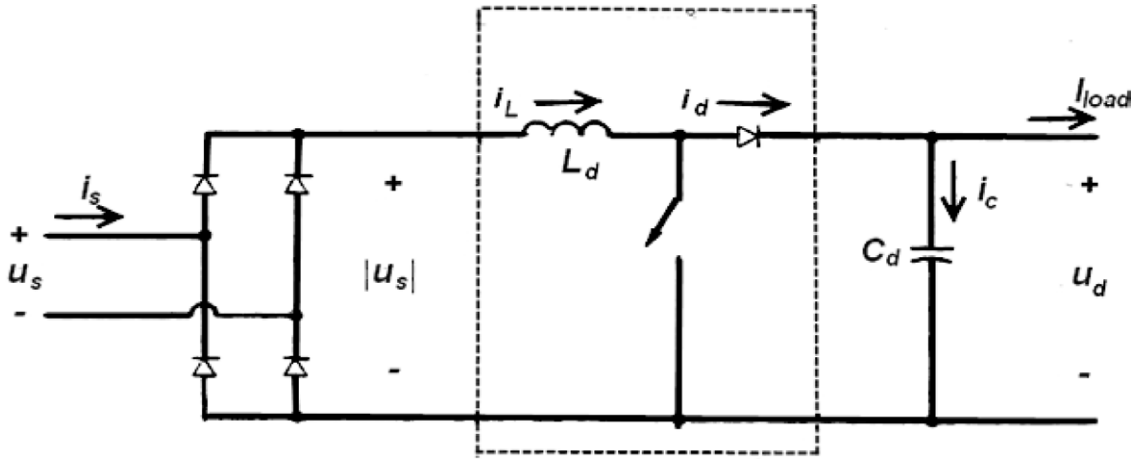


Рис. 4. Схема повышающего преобразователя

Входной ток i_s желательно подавать синусоидальным и софазным с U_s. На практике потери в мостовом выпрямителе и повышающем DC-DC-преобразователе довольно малы и в ряде случаев ими можно пренебречь. Учитывая, что $\hat{U}_S = \sqrt{2}U_S$, $\hat{I}_S = \sqrt{2}I_S$, входная мощность источника переменного тока

$$p_{in}(t) = \hat{V}_S \left|\sin \omega t\right| \hat{I}_S \left|\sin \omega t\right| = V_S I_S - V_S I_S \cos 2\omega t \,.$$

Из-за довольно большой емкости C_d, напряжение U_d может изначально считаться постоянным: $U_d(t) = U_d$. Поэтому выходная мощность $P_d(t) = U_d I_d(t)$, где, согласно рис. 4,

$$I_d(t) = I_{load} + i_c(t).$$

Если повышающий преобразователь на рис. 4 идеальный, можно предположить, что он будет функционировать на частоте переключения, приближенной к бесконечности, и L_d будет пренебрежительно мала. Это позволяет предположить, что $p_{in}(t) = p_d(t)$ в любой момент времени, поэтому $i_d(t) = i_{load} + i_c(t) = \frac{U_S I_S}{U_d}\cos 2\omega t$, где среднее значение $I_d = I_{load} = \frac{U_S I_S}{U_d}$, и ток через конденсатор $I_c(t) = -\frac{U_S I_S}{U_d}\cos 2\omega t = -I_d \cos 2\omega t$.

Даже если это предположение выполняется, на конденсаторе будет напряжение постоянного тока практически без пульсаций, а пульсации U_d могут быть вычислены как $V_{d,ripple}(t) \approx \frac{1}{C_d}\int i_c dt = -\frac{I_d}{2\omega C_d}\sin 2\omega t$, которые можно поддерживать на низком уровне, выбрав соответствующим образом большое значение C_d. Серия *LC*-фильтров, настроенная на удвоенную частоту переменного тока, может быть включена в параллель к C_d для минимизации пульсации постоянного напряжения.

Следует отметить, что частотные компоненты токов i_d и высокочастотные компоненты токов нагрузки будут также протекать через C_d. Поскольку входной ток повышающего преобразователя имеет определенную форму, повышающий преобразователь работает в токорегулируемом режиме — в связи с преобразованием из постоянного в переменный ток.

Управление с обратной связью показано на блок-схеме (рис. 5), где заданное или требуемое значение тока — i^*_L. Здесь i^*_L имеет такую же форму как $|U_s|$. Амплитуда i^*_L должна быть такая, чтобы поддерживать выходное напряжение на заданном или исходном уровне U^*_d, несмотря на изменения при нагрузке и отклонения напряжения в сети от номинального значения. Форма сигнала i^*_L получена путем измерения $|U_s|$ с помощью резистивного делителя напряжения, учитывая ошибку между заданной величиной U^*_d и фактически измеренным значением U_d. Фактический ток i_L определяется, как правило, путем измерения напряжения через небольшой резистор, вставленный в направлении, обратном i_L. Состояние переключателя в повышающем преобразователе управляется посредством сравнения фактического тока i_L и i^*_L.

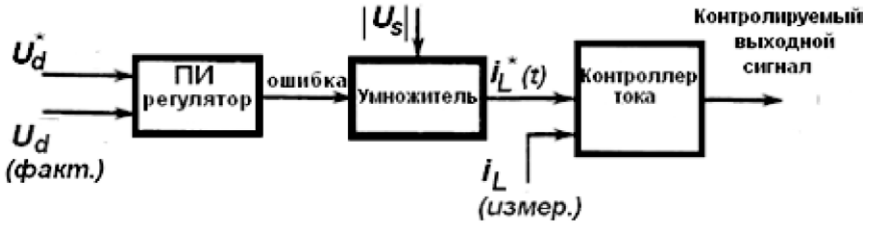


Рис. 5. Управление с обратной связью повышающего преобразователя

Мгновенное значение i^*_L и i_L определяется различными способами реализации текущего контроля режима из повышающего преобразователя. Четыре таких способа представлены далее, в них f_s — частота переключения, I_{rip} — пиковая пульсация i_L в течение одного периода времени от частоты переключения.

Определение контроля постоянной частоты описано более подробно.

1. Контроль постоянной частоты. Здесь частота переключения f_s держится постоянной. Когда i_L достигает i^*_L, переключатель повышающего преобразователя отключается. Переключатель включен на определенное время на фиксированной частоте f_s, что приводит к значению i_L, показанному на рис 6, *а*. Должна быть обеспечена компенсация разгона, иначе наклон кривой i_L будет неравномерным при значениях коэффициента переключения выше 0,5, как показано на рис. 6.

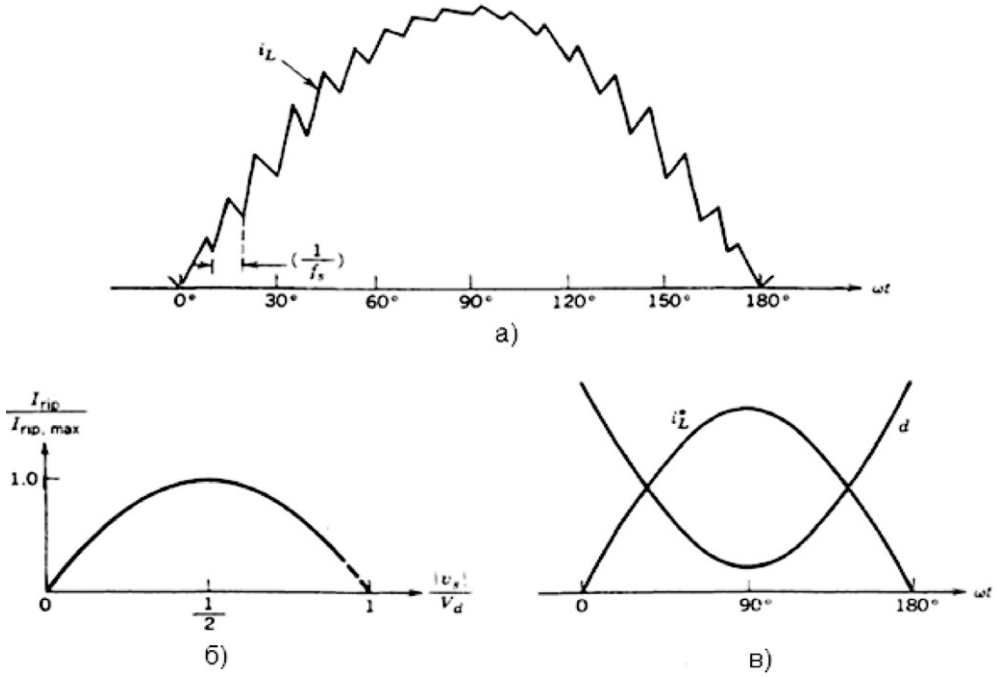


Рис. 6. Контроль постоянной частоты:
«Пилообразный» вид i_L при постоянной частоте переключения f_s (*а*);
установившееся значение пиковой пульсации I_{rip} (*б*); зависимость коэффициента *d* от ω*t* (*в*)

2. Постоянная допуска к диапазону регулирования. Здесь ток i_L управляется таким образом, что пиковая пульсация I_{rip} остается постоянной. С предварительным выбором значений I_{rip}, i_L вынуждены быть в пределах допуска $i_L{}^* + \frac{1}{2}I_{rip} - i_L{}^* - \frac{1}{2}I_{rip}$ путем регулирования положения переключателя.

3. Переключение на ручной контроль. Здесь пиковая пульсация I_{rip} увеличивается пропорционально мгновенному значению $|U_s|$. В противном случае, этот подход аналогичен управлению постоянной допуска-диапазона.

4. Управление прерывистым током. В этой схеме ключ выключен, когда i_L достигает двукратного значения i^*_L.

Ключ держится закрытым, пока i_L не достигнет нуля. В этот момент переключатель включается в обратном направлении. Это можно рассматривать как частный случай переменной допуска диапазона регулирования.

В течение периода частоты переключения предполагается, что выходное напряжение U_d не меняется, а входное напряжение повышающего преобразователя считается постоянным в данный момент времени; I_{rip} — пиковая пульсация тока в течение одного периода времени частоты переключения.

Следующие формулы могут быть выведены из рис. 4, где t_{on} и t_{off} — интервалы открытия и закрытия переключателя:

$$t_{on} = \frac{L_d I_{rip}}{|U_S|}; \tag{10}$$

$$t_{off} = \frac{L_d I_{rip}}{U_d - |U_S|}. \tag{11}$$

Частота переключения

$$f_S = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \frac{(U_d - |U_S|)|U_S|}{L_d I_{rip} U_d}. \tag{12}$$

В схеме с контролем постоянной частоты f_s = const, следовательно,

$$I_{rip} = \frac{\left(U_d - |U_S|\right)|U_S|}{f_S L_d U_d}. \quad (13)$$

На рис. 6, *б* показан график нормальной I_{rip} как функцию от $|U_s| / U_d$, учитывая, что в повышающем преобразователе отношение $|U_s| / U_d$ должно быть ≤ 1.

Максимальный ток пульсаций задается как

$$I_{rip,\max} = \frac{U_d}{4 f_S L_d}, \quad (14)$$

где $|U_S| = \frac{1}{2} V_d$.

В активном контуре тока формования с использованием повышающего преобразователя постоянного тока, сделаны следующие дополнительные замечания.

1. Выходное напряжение U_d через конденсатор C_d содержит 120 Гц пульсации, более чем в два раза превышающие частоту сети. Схема управления с обратной связью используется, чтобы управлять U_d на заданном уровне, и не может компенсировать это пульсационное напряжение, не искажая текущий ток.

2. Если переключение частоты пульсации в i_L держится с маленькой амплитудой, то возможно использовать стальной сердечник катушки индуктивности, который будет меньше по размеру из-за его более высокой плотности потока насыщения по сравнению с высокочастотными ферритовыми материалами.

3. Более высокая частота переключения позволяет обеспечить более низкое значение L_d и увеличить простоту фильтрации высокочастотной пульсации. Тем не менее, частота переключения выбирается в качестве компромисса между ранее упомянутым преимуществам и увеличением потерь при коммутации.

4. Напряжение U_d, превышающее номинальное больше, чем на 10 % после достижения пика входного переменного напряжения $\hat{U}_S$, будет вызывать снижение КПД.

5. Для ограничения пускового тока могут быть использованы токоограничивающие резисторы в серии с L_d. После первоначального переходного процесса, резистор шунтируется контактором или тиристором параллельно с токоограничивающим резистором.

6. Топология повышающего преобразователя хорошо подходит для текущего входного сигнала, потому, когда переключатель выключен, входной ток напрямую (через диод) питает выходной каскад. При управлении током постоянной частоты коэффициент заполнения переключателя *d* является функцией от ω*t* (рис. 6, *в*). Известно, что для повышающего трансформатора с входным напряжением $|U_s|$ и выходным напряжением U_d

$$|U_s| / U_d = 1 - d.$$

Следовательно, $d = 1 - \frac{|U_S|}{U_d}$.

Из рис. 6, *в* видно, что *d* — наиболее низкий пик i^*_L. Таким образом, наибольший ток проходит через переключатель только во время небольшой части периода переключения.

7. Небольшой конденсатор фильтра должен быть установлен на выходе диода мостового выпрямителя, чтобы предотвратить пульсации в i_L. Фильтр электромагнитных помех на входе по-прежнему требуется, как и в обычной схеме без активного текущего сигнала.

Выводы

Описанное электротехническое устройство осуществляет преобразование переменного тока в постоянный и реализуется за счет использования полупроводниковых приборов-транзисторов и диодов в мостовой схеме. Технический результат применения данного устройства заключается в

снижении массогабаритных показателей (по сравнению с ближайшими аналогами) для подключения управляемого выпрямителя напряжения к источнику напряжения переменного тока (в том числе массы и размера батареи конденсаторов токоограничивающих цепей) и повышении динамических показателей стадии неуправляемого заряда выходного конденсатора управляемого выпрямителя напряжения.

Список литературы

1. *Андрианова Л. П.* Моделирование переходных процессов в электрических сетях 6(10) – 35 кВ при однофазном замыкании на землю / Л. П. Андрианова, Э. Р. Байбурин // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. Международной науч.-техн. конф. — 2006. — Т. 1. — С. 302–305.

2. *Чазов Ю. О.* Теоретическая оценка величины перенапряжений при однократном однофазном замыкании на землю в сети 35 кВ / Ю. О. Чазов, И. А. Перминов, Н. П. Кочетков // Аграрный научный журнал. — 2013. — №7. — С. 56–59.

3. *Осипов Д. С.* Обзор современных средств и методов компенсации емкостных токов в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью / Д. С. Осипов, Б. Ю. Киселев, А. А. Планков, А. Г. Янишевская // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6. — С. 274.

4. *Чэнь Вей Сянь.* Новый способ гашения дуги однофазного короткого замыкания в сетях с изолированной нетралью / Чэнь Вей Сянь, Чень Хо // Электричество. — 2009. — № 1. — С. 54–57.

5. *Комлев А. В.* Исследование однофазного измерительного преобразователя активного тока, выполненного на основе трансреакторов / А. В. Комлев, Г. Е. Кувшинов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2013. — № 3. — С. 13–18.

6. *Костинский С. С.* Регулируемый дугогасящий реактор / С. С. Костинский, В. В. Михайлов, Д. С. Алексеева, В. В. Лопанский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2014. — № 3. — С. 51–54.

7. *Шкрабец Ф. П.* Контроль параметров изоляции и режима настройки дугогасящих реакторов / Ф. П. Шкрабец, А. В. Остапчук // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2004. — № 6. — С. 320–322.

8. *Кувшинов Г. Е.* Устройство для ограничения тока однофазного короткого замыкания на землю в электрической сети: пат. RU2537973C1 / Г. Е. Кувшинов, А. Н. Рыбалев, Д. П. Скобелев. — 2014. — Бюл. № 19.

9. *Кувшинов Г. Е.* Устройство для подключения управляемого выпрямителя напряжения к источнику напряжения переменного тока: пат. RU2521613C1 / Г. Е. Кувшинов, Ю. Г. Себто, М. В. Красковский, П. А. Кравцов, А. В. Кравцова. — 2015.

10. *Mohan N.* Power electronics / N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. — New York, 2005.

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.621/.626

Ю. Я. Зубарев,
д-р техн. наук, проф.;

И. В. Кукушкин,
асп.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ КАБОТАЖНЫХ СУДОВ

IMITATION MODEL OF THE COASTING SHIPS PROCESSING

В работе рассматриваются вопросы построения имитационной модели процесса обработки каботажных судов на контейнерных терминалах, включающих несколько причалов. В отличие от классической марковской модели массового обслуживания, которая дает завышенные значения вероятностных характеристик процессов обработки, таких как математическое ожидание времени ожидания каботажных судов в очереди и в терминале, спроектированная в данной работе имитационная модель основана на статистических данных разброса времени движения судна по маршруту и времени обработки судна в терминале. Предложена математическая формулировка задачи и определяются выражения, положенные в основу алгоритма, реализующего имитационную модель. На основе алгоритма разработана программа, позволяющая определять вероятностные характеристики процессов обработки каботажных судов. В работе приводятся графики, позволяющие оценить влияние среднеквадратичных отклонений случайных величин на вероятностные характеристики процессов.

This article describes imitating model of processing of coasting courts questions on container terminals, the including slightly moorings. In difference from classical Markov model of mass service which gives the overestimated values of probabilistic characteristics of processing, such as the population mean of a waiting time of coasting courts in turn and in the terminal, in work is considered the imitating model based on statistical data of dispersion of time of the movement of the vessel on a route and time of processing of the vessel in the terminal. The mathematical formulation of a task is made and the expressions which are been the basis for the algorithm realizing imitating model are defined. On the basis of algorithm the program allowing to define probabilistic characteristics of processing of coasting courts is developed. Are brought in work graphics, allowing to estimate influence of mean square deviations of random variables on probabilistic characteristics of processes.

Ключевые слова: обработка контейнерных грузов, имитационная модель, равномерное распределение, каботажные суда.

Key words: containerized cargo handling, imitation model, uniform distribution, coasting ships.

Введение

На сегодняшний день морские грузоперевозки являются одной из самых высоко финансируемых и быстро развивающихся отраслей транспорта. Последнее время в мире наблюдается стабильная тенденция роста морских контейнерных перевозок. Мировой уровень контейнеризации грузопотоков достигает 50 – 60 % от общего уровня перевозок, что подчеркивает перспективность развития данного вида транспорта.

Перевозки каботажных грузов можно рассматривать как последовательный ряд циклических операций, где каждое отдельное судно перевозит груз от одного порта к другому, а затем возвращается и повторяет операцию снова. Обычно для выбора количества причалов или оптимальной загрузки перегрузочных терминалов используются детерминированные модели

процессов обработки каботажных судов, но при обработке и исследовании детерминированных моделей вступают в силу допущения, значительно идеализирующие процессы обработки грузов. Поэтому для решения этих задач Б. В. Гнеденко предложил использовать марковские модели массового обслуживания. Однако применение марковских моделей массового обслуживания [1] – [4] не всегда целесообразно для исследования процессов обработки контейнерных грузов, так как расчеты, проводимые на основе этих моделей, существенно увеличивают время ожидания судов в очереди по сравнению с реальными условиями функционирования на перегрузочных терминалах.

В работах [5] – [9] была предложена аналитическая модель переработки каботажных грузов, которая основывалась на частной теореме о повторении опытов. Эта модель учитывала недостатки марковских моделей массового обслуживания, что позволило значительно повысить точность вычислений. Однако модель в работах [5] – [9] даёт несколько заниженные значения вероятностных характеристик.

В настоящей работе будет представлена имитационная модель расчета вероятностных характеристик с учетом случайного разброса таких величин, как время обработки судна в порту и время движения судна по маршруту, что позволяет получить более точные результаты.

Постановка задачи

Постановкой задачи является разработка имитационной модели, учитывающей разброс времени обработки судна и время движения судна по маршруту. Разброс будет формироваться на основе равномерного распределения. При этом точность определения вероятностных характеристик повышается за счет проведения большого числа опытов и усреднения результатов.

Актуальность

Данная имитационная модель и описанные в ней алгоритмы позволят значительно увеличить эффективность проектирования перегрузочных контейнерных терминалов в морских портах. Применение данной модели позволит оптимизировать процесс обработки каботажных судов путем оптимального планирования и оперативного управления этими процессами.

Математическая формулировка задачи

Будем рассматривать два контейнерных терминала, между которыми осуществляется перевозка грузов, включающих S_1 и S_2 причалов соответственно. Рассмотрим движение одного судна в прямом и обратном направлении. Время цикла операции $T_ц$ является случайной величиной. Необходимо определить математическое ожидание времени цикла, равное сумме математических ожиданий отдельных составляющих

$$\overline{T}_ц = \overline{T}_{м1} + \overline{T}_{м2} + \overline{T}_{обр1} + \overline{T}_{обр2} + \overline{T}_{ож1} + \overline{T}_{ож2}. \quad (1)$$

Как видно из [1], время движения судна по маршрутам $\overline{T}_{м1}$ и $\overline{T}_{м2}$ существенно зависит от гидрометеорологических условий. Это значит, что даже через небольшое количество рейсов интервалы между приходами судов могут сильно отличаться друг от друга, что делает их случайными величинами. Кроме этого, нельзя забывать, что время обработки каботажных судов также зависит от различных факторов, следовательно, оно тоже является случайной величиной. Поэтому для описания процессов переработки каботажных грузов следует использовать не детерминированные, а вероятностные модели. Основываясь на этом, введем в модель разброс величин $\overline{T}_{м1}$, $\overline{T}_{м2}$, $\overline{T}_{обр1}$ и $\overline{T}_{обр2}$.

С учетом равномерного закона распределения можно записать следующие выражения для математического ожидания и среднего квадратичного отклонения указанных величин:

$$M = \frac{a+b}{2}; \tag{2}$$

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12}, \tag{3}$$

где a и b — границы разброса величин.

Выразим среднее квадратичное отклонение величины через его математическое ожидание

$$\sigma = rM, \tag{4}$$

где r — коэффициент пропорциональности.

Решив систему уравнений (2) и (3), определим пределы изменения случайной величины:

$$b = (1 + r\sqrt{3})M; \tag{5}$$

$$a = (1 - r\sqrt{3})M.$$

Случайную величину с разбросом на интервале [a ... b] получаем из выражения

$$a + c(b-a). \tag{6}$$

Для получения разброса будем задавать случайную величину c на каждой итерации. Эти случайные величины должны подчинялись равномерному закону распределения на интервале [0 ... 1].

Стоит также отметить, что при слишком малой величине r разброс будет маленьким, в частности, если задать её равной нулю, мы получим нулевой разброс значения, т.е. границы сольются в одну точку $a = b = M$, что соответствует аналитической модели [5] – [9].

Разделив $\overline{T}_{ож}$ и $\overline{T}_{м}$ на среднее время переработки грузов, мы получим выражения для среднего приведенного времени ожидания в очереди и среднего приведенного времени движения судна по маршруту:

$$\overline{\tau}_{ож} = \frac{\overline{T}_{ож}}{\overline{T}_{обр}}, \tag{7}$$

$$\overline{\tau}_{м} = \frac{\overline{T}_{м}}{\overline{T}_{обр}}. \tag{8}$$

Приведем схему алгоритма работы имитационной модели с учетом разброса случайных величин (формулы (7), (8)).

Рис. 1 является вспомогательным алгоритмом, который представляет собой вычисление границ разброса на основе математического ожидания случайной величины, параметра r, отвечающего за величину разброса, и случайной величины c, заданной на интервале [0 ... 1]. Случайная величина c генерируется на каждой итерации таким образом, что множество этих сгенерированных величин подчиняются равномерному закону распределения.

На рис. 2 изображена схема алгоритма работы имитационной модели. Как видно из блок-схемы, алгоритм включает цикл из десяти тысяч повторяющихся итераций. Данное количество повторений было выбрано для подсчета среднестатистических значений математического ожидания и среднего квадратичного отклонения.

Рассмотрим влияние величины r на значения среднего приведенного времени ожидания судна в очереди $\overline{\tau}_{ож}$.

На рис. 3 и 4 изображены графики, а в соответствующих им табл. 1 и 2 произведены расчеты зависимости времени ожидания от приведенного среднего времени движения судна по маршруту и величины r. Значение $r = 0$ соответствует аналитической модели [5] – [9], а r_{max} — марковской модели массового обслуживания.

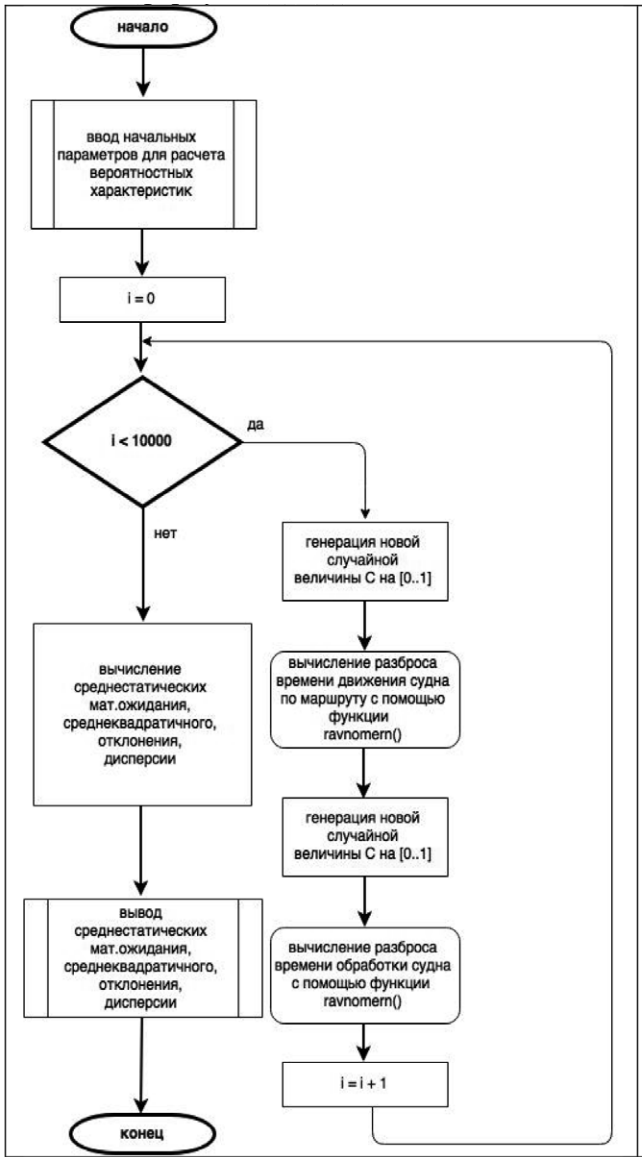


Рис. 1. Основной алгоритм

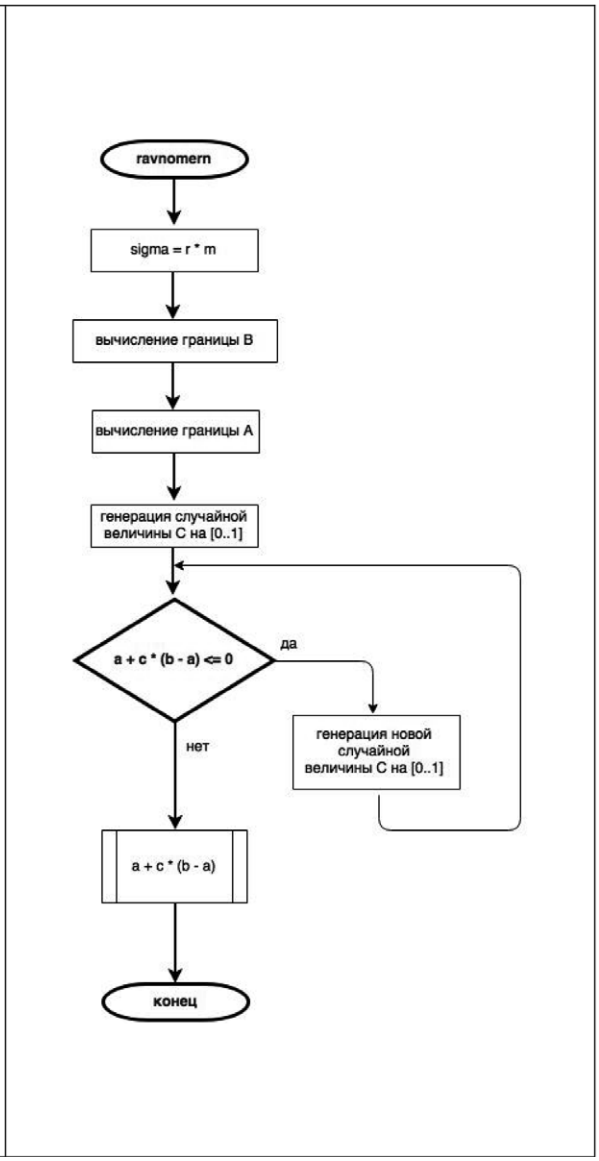


Рис. 2. Вспомогательный алгоритм

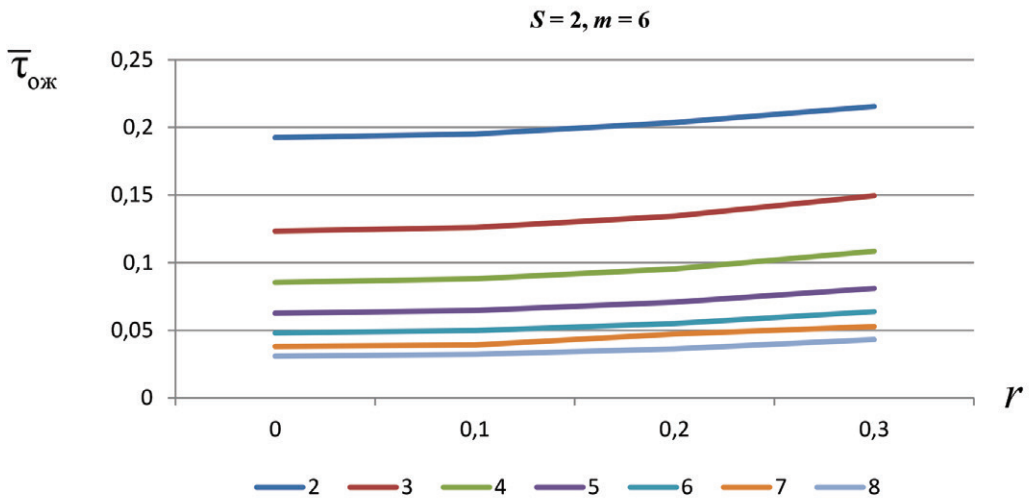


Рис. 3. Зависимость времени ожидания
от величины разброса при количестве судов $m = 6$

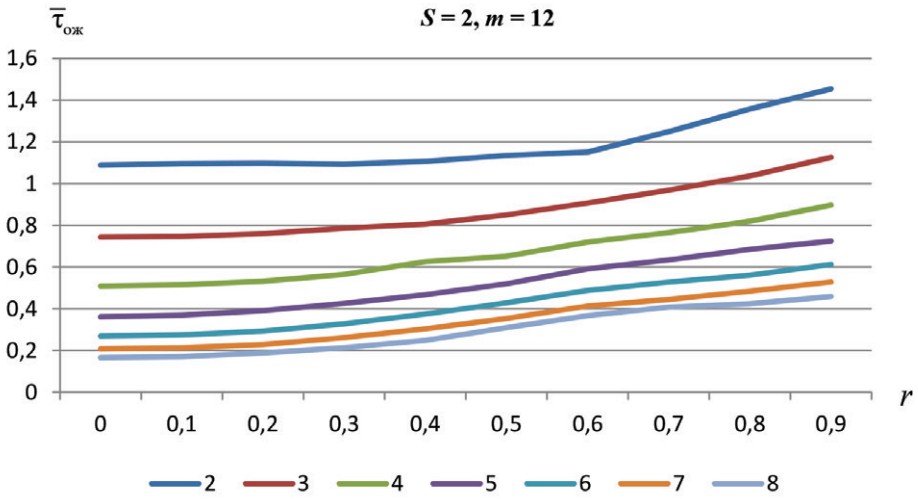


Рис. 4. Зависимость времени ожидания
от величины разброса, при числе судов $m = 12$

Таблица 1

Зависимость времени ожидания от величины разброса и времени движения судна по маршруту при количестве судов $m = 6$

r	$\bar{\tau}_{м}$						
	2	3	4	5	6	7	8
0	0,19242	0,12325	0,08539	0,06269	0,04803	0,03801	0,03086
0,1	0,19506	0,12595	0,08798	0,06459	0,04979	0,03912	0,03216
0,2	0,20357	0,13438	0,09541	0,07080	0,05497	0,04717	0,03620
0,3	0,21543	0,14947	0,10846	0,08099	0,06382	0,05278	0,04319

Таблица 2

Зависимость времени ожидания от величины разброса и времени движения судна по маршруту при числе судов $m = 12$

r	$\bar{\tau}_{м}$						
	2	3	4	5	6	7	8
0	1,08875	0,74304	0,50808	0,36086	0,26817	0,20730	0,16542
0,1	1,09587	0,74588	0,51443	0,36818	0,27428	0,21226	0,17016
0,2	1,09763	0,75934	0,53130	0,39021	0,29236	0,22785	0,18759
0,3	1,09269	0,78648	0,56445	0,42577	0,32744	0,26136	0,21313
0,4	1,10591	0,80531	0,62579	0,46708	0,37450	0,30353	0,24808
0,5	1,13478	0,84958	0,65146	0,51908	0,42853	0,35297	0,30946
0,6	1,15034	0,90690	0,71951	0,59127	0,48792	0,41297	0,36620
0,7	1,24951	0,96857	0,76500	0,63441	0,52787	0,44488	0,40830
0,8	1,35784	1,03632	0,81937	0,68505	0,56092	0,48428	0,42377
0,9	1,45407	1,12612	0,89668	0,72452	0,61207	0,52838	0,45846

Нужно отметить, что оптимизация работы контейнерных терминалов [10] может повлиять на среднее приведенное время ожидания судов в очереди и значительно ускорить весь цикл, однако это в дальнейшем может также учитываться в выборе более низких значений величины разброса *r*.

Как видно из графиков и таблиц, с увеличением числа судов *m* существенно возрастает величина *r*, соответствующая марковской модели массового обслуживания. В общем случае r_1 и r_2 берутся различными для разброса значений $\overline{T}_{\text{м}}$ и $\overline{T}_{\text{обр}}$. В данной работе для простоты иллюстрации влияния величин r_1 и r_2 будем брать их равными $r_1 = r_2 = r$.

Выводы

1. Значения времени ожидания судна в очереди из табл. 1 и 2, приведенных в данной статье, начинают совпадать с марковской моделью с $m = 6$ при r в диапазоне [0,2 … 0,3], а с $m = 12$ — при r в диапазоне [0,4 … 0,9]. Стоит заметить, что с увеличением τ_m величина разброса *r*, с которой достигается значения марковской модели, снижается.

2. Для построения имитационной модели необходимо (на основе статистических данных по разбросу величин $\tau_{\text{м}}$ и $\tau_{\text{обр}}$) определить величины r_1 и r_2, что позволит наиболее точно определить вероятностные характеристики процессов переработки каботажных грузов: среднее число судов, находящихся в очереди; среднее число судов, находящихся в терминале; среднее время пребывания судна в очереди и среднее время пребывания судна в терминале.

3. Применение данной модели позволяет обеспечить оптимальное управление каботажными перевозками в транспортно-технологическом комплексе, включающем два терминала.

Список литературы

1. *Зубарев Ю. Я.* Оптимизация процессов переработки каботажных грузов / Ю. Я. Зубарев, А. М. Тюкавин. — СПб.: Политехника, 2009. — 168 с.

2. *Зубарев Ю. Я.* Идентификация процессов переработки контейнерных грузов на основе оптимальных планов вычислительного эксперимента / Ю. Я. Зубарев, И. А. Русинов // Аудит. — 2008. — № 6. — С. 454–460.

3. *Русинов И. А.* Формализация процессов переработки контейнерных грузов / И. А. Русинов, Н. Ю. Барышникова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2010. — № 97. — С. 48–53.

4. *Русинов И. А.* Анализ методов многокритериальной оптимизации процессов переработки грузов в контейнерах / И. А. Русинов // Аудит. — 2009. — № 2. — С. 138–140.

5. *Гайнуллин А. С.* Вероятностная формализация процессов обработки каботажных судов на контейнерных терминалах / А. С. Гайнуллин, Ю. Я. Зубарев // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 70–74.

6. *Зубарев Ю. Я.* Вероятностные характеристики процессов обработки каботажных и экспортно-импортных судов на контейнерных терминалах / Ю. Я. Зубарев, Д. С. Ловяников // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 1 (66). — С. 72–73.

7. *Зубарев Ю. Я.* Вероятностная формализация процессов обработки контейнерных грузов с учетом ограничений на число судов в очереди / Ю. Я. Зубарев, Д. С. Ловяников // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 109–113.

8. *Ловяников Д. С.* Оптимальное управление процессами совместной обработки экспортно-импортных и каботажных судов на контейнерных терминалах / Д. С. Ловяников, Ю. Я. Зубарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 101–107.

9. *Зубарев Ю. Я.* Моделирование процессов переработки контейнерных грузов на основе немарковских моделей массового обслуживания / Ю. Я. Зубарев, А. С. Гайнуллин, А. С. Хвастунов // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта в России: материалы II Межвуз. науч.-практ. конф. студ. и аспирантов. — СПб.: Изд-во ГМА имени адмирала С. О. Макарова, 2001. — С. 12–13.

10. *Русинов И. А.* Оптимизация работы контейнерных терминалов / И. А. Русинов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2010. — № 22 (198). — С. 31–36.

УДК 004.424.27, 004.725.4

А. А. Некрасова,
асп.;

С. С. Соколов,
канд. техн. наук, доц.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ НА ТРАНСПОРТЕ

STUDY OF THE POSSIBILITY OF PERCOLATION THEORY FOR FLOW CONTROL IN INFORMATION NETWORKS TRANSPORT

Современный уровень развития информационных технологий (ИТ) предполагает рост взаимодействия элементов информационных систем. Развитие информационных сетей (ИС) и рост объемов обмена информацией требуют разработки новых средств моделирования взаимодействия элементов и управления информационными потоками (ИП) данных в них. Снижение пропускной способности информационной сети, угроза разрушения механизма управления потоками данных в сети, необходимость перераспределения ИП — все это является актуальными проблемами ИС. Решение этих проблем позволит оптимизировать управление потоками данных и работы сети в целом: повысить эффективность использования полосы пропускания, увеличить возможности динамического распределения сетевых ресурсов, достичь более высокого уровня автоматизации и контроля сети. В статье проведен анализ существующих методов и алгоритмов теории перколяции. Динамические процессы, протекающие в ИС, требуют применения адекватных математических алгоритмов, которыми являются методы перколяции (протекания). Перколяционная модель представляет собой распространение процесса на решетке, при котором существует хотя бы один непрерывный путь через соседние проводящие узлы от одного до другого края. Метод применен для информационных сетей на транспортных объектах.

The present level of development of information technologies assumes increase interaction of elements of information systems. The development of information networks and the growth of the exchange of information will require the development of new tools for modeling the interaction of the elements and information management data in them. Reduced bandwidth information network; threat of the destruction of the mechanism of management of data flows in the network, the need for redistribution of information flows – all of this is the most pressing problems in information networks. Solving these problems will lead to improved performance and data flow management of the network as a whole. One of the solutions is to increase bandwidth efficiency, the ability to dynamically allocate network resources, a higher level of automation and control networks. The article provides an analysis of existing methods and algorithms for percolation theory. Dynamic processes in information networks require the use of appropriate mathematical algorithms, which are the methods of percolation (percolation). The percolation model is an extension of the process on a lattice, in which there is at least one continuous path through the adjacent conductive components from one to the opposite edge. These methods can be applied to work with information networks to transport objects.

Ключевые слова: перколяция, статистическое моделирование, информационные сети, управляемая перколяция, перколяционные модели, дискретная перколяция.

Key words: percolation, statistical modeling, information networks operated by percolation, percolation models, discrete percolation.

Введение

Теория перколяции — это новый подход в управлении потоками данных в информационных сетях. С помощью перколяционных моделей можно производить эффективные расчеты, исследовать надежность сети и защищать многосвязный узел в информационной сети.

В данной работе предлагается использовать дискретную перколяцию на объектах водного транспорта. Приведенный метод может быть применен для работы с информационными сетями для обеспечения максимально эффективного использования полосы пропускания, возможности динамического распределения сетевых ресурсов, а также контроля процесса [1].

Основная часть

Один из развиваемых подходов к исследованию информационных сетей связан с моделью «протекания» по их ребрам безопасного информационного трафика, транспортного трафика, потоков обслуживания и т.п. Теория перколяции решает задачи анализа больших сетей в рамках этой модели [2], [3].

Постановка задачи теории перколяции. Имеется решетка из связей или матрица, случайная часть ячеек которых $\boldsymbol{K}$ — «черная», проводящая поток, а остальная часть — «белая», не проводящая поток. Необходимо найти минимальную концентрацию «черных» ячеек, при которой имеется сквозной путь по «черным» связям через всю матрицу в заданном направлении, иными словами, такую концентрацию $\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{п}}$, при которой вся матрица в целом будет проводить поток. При достижении проводимости свойства такой сети качественно и скачком меняются: образуется безопасный путь (или он разрушается), возникает (или затухает) эпидемия, воссоздается разрушенная социальная сеть, возникает пробка в дорожном движении и т.п. Концентрация $\boldsymbol{K}$ — это доля «черных» узлов при случайно-однородном заполнении решетки, или матрицы, которая является вероятностью наличия «черного» объекта в ячейке матрицы [4].

Статистическое моделирование на таких случайных матрицах позволяет обнаружить и исследовать статистический феномен порога перколяции как «пробоя» матрицы проводящим перколяционным кластером при достижении вероятности нахождения объекта в ячейке значения $\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{п}}$. Теория «протекания» позволяет определить порог перколяции, уровень вероятности, или концентрации $\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{п}}$, при которой наступает перколяция, и имеет много точных аналитических результатов. Основной используемый ею метод — численное статистическое моделирование на решетках или деревьях.

Рассмотрим общий случай перколяционной задачи узлов, когда функция распределения узлов является произвольной. Пусть производящая функция вероятности распределения степеней узлов имеет вид

$$F_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k q_k x^k, \tag{1}$$

где p_k — вероятность того, что случайно выбранный узел имеет степень k; q_k — вероятность того, что узел помечен, учитывая, что он имеет степень k [5].

Обозначим общую долю занятых узлов — q. Тогда $F_0(1) = q$. При случайно выбранной связи достигнутый узел имеет степень распределения kp_k. Определены условия, при которых случайно выбранная связь приведет к узлу высокой степени. Уравнение (1) для такого узла имеет вид

$$F_1(x) = \frac{\sum_k k p_k q_k x^{k-1}}{\sum_k k p_k} = \frac{F_0(x)}{z}, \tag{2}$$

где z — средняя степень узла.

Пусть $P_1(x)$ — производящая функция, характеризующая вероятность того, что один конец случайно выбранной связи в сети приводит к перколяционному кластеру данного числа занятых узлов. Кластер может содержать крайний узел в конце связи с вероятностью $(1 - F_1(1))$, или связь может привести к заполненному узлу со степенью k с вероятностью $F_1(1)$. Это означает, что $P_1(x)$ удовлетворяет условиям самоорганизации:

$$P_1(x) = 1 - F_1(1) + xF_1[P_1(x)]. \quad (3)$$

Распределение вероятности размера кластера для случайно выбранного узла выглядит аналогично:

$$P_0(x) = 1 - F_0(1) + xF_0[P_1(x)]. \quad (4)$$

Совокупность уравнений (1) – (4) позволяет определить распределение размера кластера для задачи узлов перколяции, средний размер кластера, значение порога перколяции и размеры компоненты.

Для перколяционной связи с равномерным распределением получена вероятность

$$P_0(x) = x[P_1(x)], \quad (5)$$

где $P_1(x)$ находится по следующей формуле:

$$P_1(x) = 1 - q + qxG_1[P_1(x)], \quad (6)$$

где $G_1(x) = \frac{G_0^{'}(x)}{z}$ — производящие функции для степени узла.

$P_0(x)$ находится по формуле:

$$P_0(x) = 1 - q + qxG_0[P_1(x)]. \quad (7)$$

Здесь $G_0(x) = \sum_k p_k x^k$.

Для определения среднего размера кластера в сети до порога перколяции используется формула

$$< S >= P_0^{'}(1) = q + qG_0^{'}(1)P_1^{'}(1) = q[1 + \frac{qG_0^{'}(1)}{1 - qG_1^{'}(1)}]. \quad (8)$$

Выражение расходится при $1 - qG_1(1) = 0$. Эта точка отмечает значение порога перколяции. Таким образом, вероятность критической заполненности имеет вид

$$q_c = \frac{1}{G_1^{'}(1)}. \quad (9)$$

Специфика задач управления потоками данных в ИС на транспорте состоит в разнообразии целей управления, таких как инфраструктура водного транспорта; обеспечение судоходства на водных путях; необходимость согласования различных управляющих указаний, поступающих от органов власти и администрации различного уровня и органов управления движением; учет всевозможных климатических явлений; состояние сети и т. д. Существенное влияние оказывают также большая размерность объекта управления, работа в режиме реального времени и нестационарность параметров транспортной сети и маршрутов движения водного транспорта. Решением этих задач является использование алгоритмов и методов управления потоками данных, сочетающих современные технологии сбора и обработки информации и ориентированных на применение в транспортных системах [6], [7].

Дискретный вариант перколяционных моделей

В информационных сетях часто используется дискретный вариант перколяционных моделей. Частицы среды представляются как вершины графа, имеющие два состояния: «проводящее» и «непроводящее». Смежными считаются соседние вершины, которые находятся в проводящем

состоянии. Назначение состояний вершин происходит в случайном порядке, но с одинаковой вероятностью p. В такой постановке порог перколяции — это значение вероятности p^*, при котором в графе образуется «перколяционный кластер» — т. е. связная область, обеспечивающая протекание через среду [8].

Методы теории перколяции для вычислительных сетей на транспорте. Проведение вычислительного эксперимента

Как уже отмечалось, специфика транспортной сферы заключается в разнообразии, с одной стороны, задач передачи данных, а с другой — в разнообразии структуры вычислительной сети и характеристик каналов передачи данных. Таким образом, для формализованного определения моделей передачи данных в вычислительных сетях транспортной сферы необходимо в самом начале понимать нестационарный и непредсказуемый характер таких сетей, который может заключаться, в том числе, в непрогнозируемом росте количества подключений к отдельным узлам и формированию. В этом случае можно говорить о формировании огромных, сильно связанных компонент, которые характеризуются неограниченным ростом числа узлов при соблюдении условия достижимости любой пары из них. Это позволило сделать вывод о том, что в информационных сетях наиболее естественным является использование именно дискретной перколяции, в котором с учетом сетевой специфики для удобства лучше рассматривать граф, характеризуемый состоянием ребер, а не вершин. В этом случае в подграф должны входить все вершины, а условие смежности вершин выполняется при условии соединения их ребром, находящемся в проводящем состоянии.

Для определения порога перколяции был проведен вычислительный эксперимент, в котором анализировалось распространение информации (пакета) через соседние вершины графа. Пересылка пакета в соседнюю вершину осуществляется с вероятностью p, а вся информация будет доставлена с некоторой вероятностью $w(p)$. При появлении каждого события случайная величина может принимать значение 1, т. е. связь будет активной, и тогда вероятность равна f, а может принимать значение 0 и связь не является активной, тогда вероятность равна $(1– f)$. Такая изменчивость задается параметром μ. Закон распределения величин f — степенной, варьируя его параметры, получим заданное среднее Mf [9], [10].

Эксперимент проводился на двух топологиях квадратной решетки $N \times N$. В первой топологии диагональных связей не было, т. е. у каждого узла было четыре «соседа», а во второй топологии были диагональные связи, и у каждого узла — восемь «соседей». Были выбраны три сети: $N = 100$, $N = 300$, $N = 500$. Крайние слева узлы в количестве N являются отправителями, а правые — получателями. Выходной параметр w — доля дошедших до последнего узла. Порог перколяции находится с точностью минимальной длины отрезка разбиения, в данном случае 0,01. На рис. 1 и 2 представлены результаты по двум топологиям.

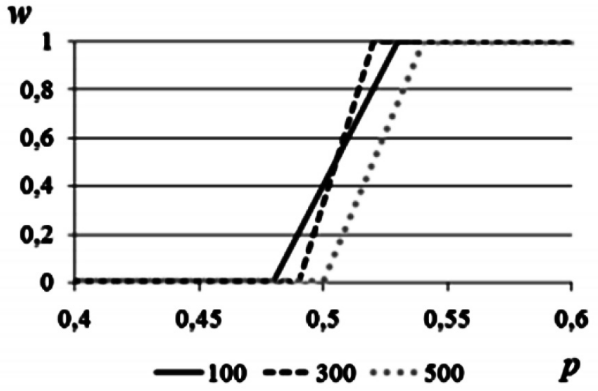


Рис. 1. Пороги перколяции для первой топологии

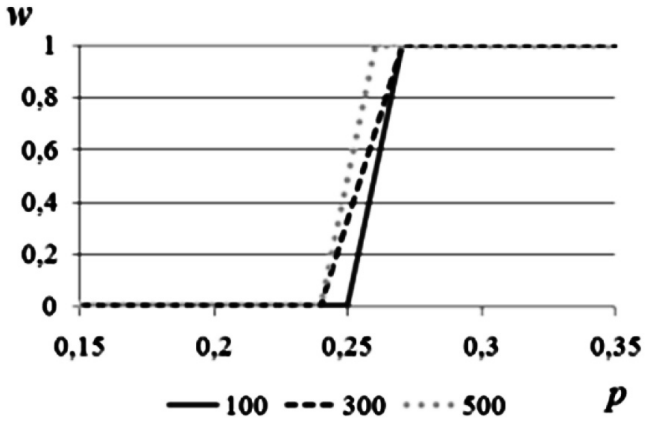


Рис. 2. Пороги перколяции для второй топологии

На рис. 3 и 4 представлены рассмотренные ранее графики с учетом параметров связей, выбранных для первой топологии $Mf = 0{,}75$, а для второй топологии $Mf = 0{,}5$.

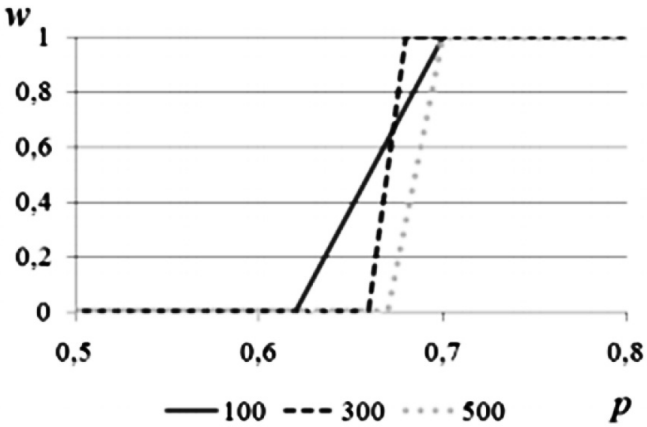


Рис. 3. Пороги перколяции для динамической сети первой топологии

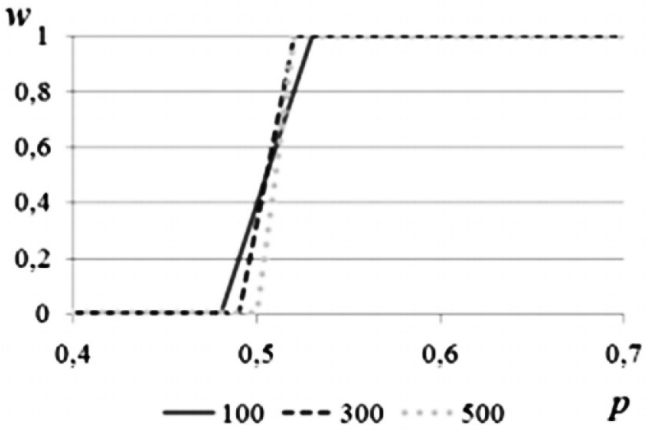


Рис. 4. Пороги перколяции для динамической сети второй топологии

Таким образом, динамическая сеть ведет себя аналогично статической, но с большим параметром перколяции. На рис. 5 представлен график совпадения прогноза и эксперимента, и, как видно, они совпадают.

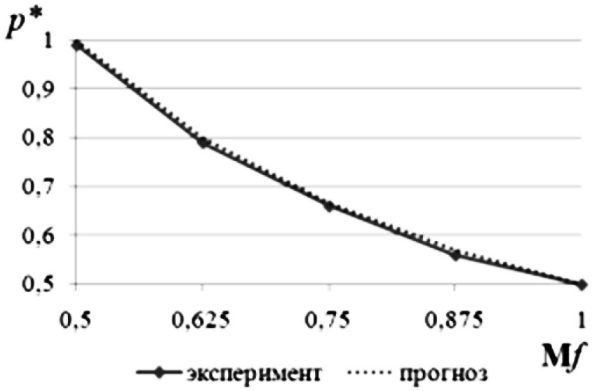


Рис. 5. Порог перколяции для динамических сетей в зависимости от *Mf*

Выводы

В результате проведенного исследования выявлена возможность и перспективность использования теории перколяции для вычислительных сетей транспортной сферы с целью обеспечения целостности передачи данных, особенно в условиях случайного возникновения сегментов таких сетей, структура которых динамично изменяется, переставая носить стационарный характер.

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что значение порога перколяции в динамическом и статическом случаях взаимосвязаны через статистическую величину, которая характеризует временные параметры связей (средняя вероятность активности связи). Данный метод можно применять в информационных сетях, в которых уровень изменений топологий высок и доставка данных является единственным способом упорядочивания структуры сети.

Список литературы

1. *Алешкин А. С.* Использование теории перколяции при описании информационных вычислительных сетей / А. С. Алешкин // Информатизация и глобализация социально-экономических процессов: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. — М.: ВНИИПВТИ, 2007. — С. 16–18.

2. *Тарасевич Ю. Ю.* Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. — М.: УРСС, 2012. — 112 с.

3. *Тарасевич Ю. Ю.* Математическое и компьютерное моделирование / Ю. Ю. Тарасевич. — М: Едиториал УРСС, 2003.

4. *Москалев П. В.* Математическое моделирование пористых структур / П. В. Москалев, В. В. Шимтов. — М: Физматлит, 2007. — 120 с.

5. *Воронюк М. Н.* Математическое моделирование процессов фильтрации в перколяционных решетках с использованием вычислительных систем сверхвысокой производительности / М. Н. Воронюк // Известия вузов. Серия: Приборостроение. — 2013. — Т. 56. — № 5. — С. 52–57.

6. *Нырков А. П.* Мультисервисная сеть транспортной отрасли / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. С. Белоусов // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 4 (118). — С. 33–38.

7. *Нырков А. П.* Обеспечение необходимого режима информационной защищенности активов мультисервисной сети транспортной отрасли / А. П. Нырков, С. С. Соколов, Е. А. Мустакаева, В. А. Мальцев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2014. — № 1. — С. 47–51.

8. *Голубев А. С.* Эффект перколяции в информационных сетях с неустойчивыми связями / А. С. Голубев, М. Ю. Звягин, Д. С. Милованов // Вестник нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2011. — № 11. — С. 260–263.

9. *Мостовой Я. А.* Управляемая перколяция в больших сетях / Я. А. Мостовой // Инфокоммуникационные технологии. — 2013. — Т. 11. — № 1. — С. 53–62.

10. *Антонова А. А.* Среда моделирования для решения перколяционных задач / А. А. Антонова, Е. Н. Головченко, Д. В. Петров // Наукоемкие технологии. — 2008. — № 7. — С. 26–30.

УДК 681.5; 004.5

А. А. Жиленков,
канд. техн. наук, ст. преп.;

И. Л. Титов,
асп.;

С. Г.Черный,
канд. техн. наук, доц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА

MODELING OF INCREASING THE RELIABILITY AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS IN AUTONOMOUS SYSTEMS FOR MARITIME TRANSPORT OBJECTS

В статье рассматривается вопрос обеспечения устойчивой работы газодизель-генераторных агрегатов в качестве основных источников энергии на морских буровых платформах с возможностью параллельной работы двух и более агрегатов. До сих пор их внедрение на подобных объектах не представлялось возможным ввиду сложности управления их топливной системой и, как следствие, сложности стабилизации их частоты при резко переменном характере питаемой нагрузки. Коммутационные процессы, обусловленные подключением и отключением нагрузок, приводят к возникновению обменных колебаний мощности между параллельно работающими генераторами. Авторами обоснована необходимость использования дифференциальной составляющей в регуляторе дизеля и установлена аналитическая зависимость между параметрами регулятора и дизеля, позволяющая устанавливать допустимую степень колебательности системы. Показано, что с помощью подстройки коэффициентов ПИД-регулятора нечётким регулятором можно оптимизировать динамические режимы регулирования во всем диапазоне нагрузок и в 15 – 20 раз снизить дисперсию колебаний оборотов вала газодизеля.

The article deals with the issue of ensuring stable operation of the gas generating units as the main source of energy for offshore platforms with the possibility of parallel operation of two or more units. Until now, their implementation at such facilities has not been possible due to the complexity of managing their fuel system and, consequently, the complexity of stabilization of their frequency at alternating nature of the load supplied. Switching processes caused by connecting and disconnecting loads, give rise to exchange power oscillations between parallel running generators. The authors of the necessity of using the differential component of the controller of a diesel engine and an analytical dependence between the parameters of the controller and the diesel engine, allows you to set the acceptable level of the oscillating system. It is shown that using the adjustment coefficients Proportional-integral-differentiating controller fuzzy controller will optimize the dynamic regimes throughout the load range and 15 – 20 times lower the dispersion fluctuations of gas diesel engine shaft speed.

Ключевые слова: генератор, нагрузка, динамический режим, регулятор, мощность.
Key words: generator, load, dynamic mode, controller, power.

Введение

Использование в автономных электроэнергетических системах (АЭЭС) морских буровых платформ (БП) газодизельных двигателей в качестве приводных двигателей основных источников энергии газодизель-генераторных агрегатов (ГДГА) позволяет обеспечить:

– использование в качестве топлива ГДГА добываемого попутно с нефтью нефтяного газа, что снизит себестоимость эксплуатации БП;

– возможность работы главных источников энергии АЭЭС БП на дизельном и на газодизельном топливе, что увеличит надежность АЭЭС БП;

– улучшение экологических показателей добычи, так как продукты сгорания газодизельного топлива на 80 % менее токсичны по сравнению с выхлопами дизель-генераторных агрегатов, и в выхлопных газах ГДГА нет твердых составляющих — частиц двуокиси серы и сажи;

– снижение износа деталей двигателя ГДГА, так как в связи с отсутствием в продуктах сгорания окиси серы и сажи на деталях не образуется нагар, масло не загрязняется и срок службы двигателя возрастает в 1,5 – 2 раза [1] – [3].

Проблемным местом в использовании ДГДА на БП является их система автоматического регулирования подачи топлива, к основным типам которой относятся механические и электронные системы. Применение механических систем регулирования ГДГА возможно только при индивидуальной работе на нагрузку. Существующие электронные системы управления применяются также для транспортных средств, где потребности в параллельной работе ГДГА на общие шины нет.

Проблема устойчивости ГДГА в АЭЭС БП

Автономная электроэнергетическая система морской БП представляет собой сложный электротехнический комплекс источников и потребителей электроэнергии, работающих в различных, изменяющихся во времени режимах работы, основным из которых являются непрерывный, кратковременный и повторно-кратковременный режимы. Каждый потребитель при этом характеризуется загрузкой, которая не зависит от режимов работы других электропотребителей. Построить общую диаграмму нагрузок АЭЭС, учитывая загрузку каждого потребителя, невозможно. С другой стороны, необходимо учитывать специфику работы электропривода буровой платформы. Вопросы данной тематики были рассмотрены А. Х. Мирзаджанзаде, а также в работах [1] и [5].

На рис. 1 приведена динамическая модель газодизельного двигателя (ГД), реализованная в MatLab-Simulink с установленными параметрами, близкими к физическим, с нагрузкой 80 % от номинальной. Из рис. 1 видно, что ГД можно представить тремя последовательно соединенными звеньями, где каждое звено характеризуется большим коэффициентом усиления. Звено с положительной обратной связью учитывает влияние трубокомпрессора [1], [5]. Коэффициенты передачи турбокомпрессора и дизеля изменяются в зависимости от нагрузки.

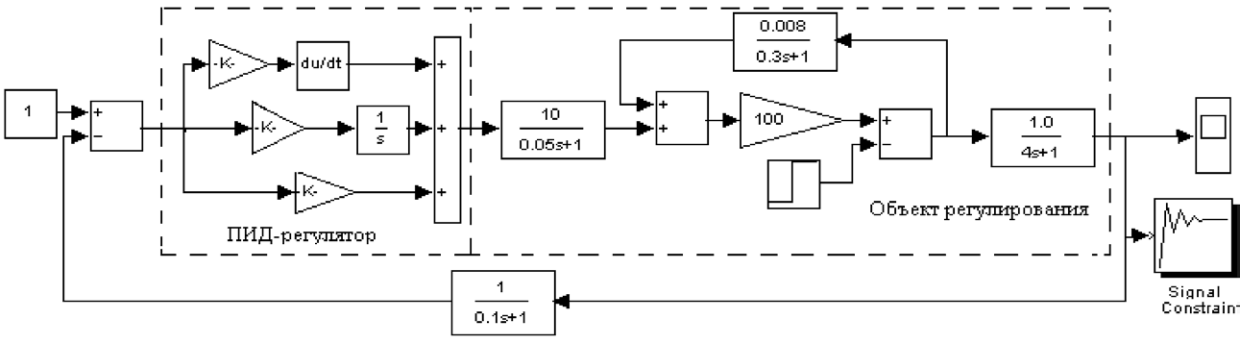


Рис. 1. Динамическая модель ГД

По отношению к ПИД-регулятору ГД является объектом регулирования. Динамические свойства объекта регулирования по управляющему и возмущающему воздействию характеризу-

ются кривой переходного процесса, полученной в результате моделирования и представленной на рис. 2.

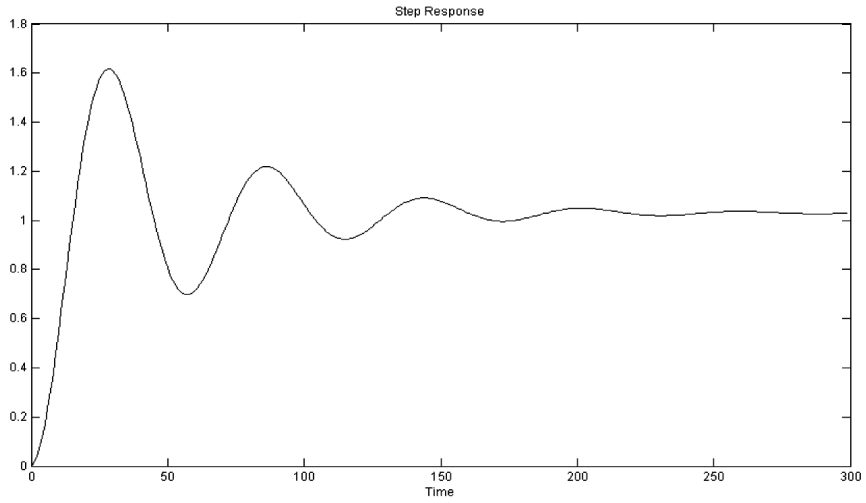


Рис. 2. Кривая переходного процесса ГД

Кривая на рис. 2 отражает реакцию объекта управления на единичный скачок. Полученный переходной процесс характеризуется некоторой собственной частотой ω_0 и коэффициентом колебательности m_0 системы. При возникновении возмущающих воздействий параметры регулятора необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить степень затухания, исключающую появление в выходном параметре системы колебательных процессов. Для разных параметров регулятора исследуем возможное снижение показателя колебательности m_c системы, включающей ПИ-регулятор и объект регулирования, для возмущающих воздействий и его возможные численные значения, проанализировав логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) регулятора и объекта, представленные на рис. 3.

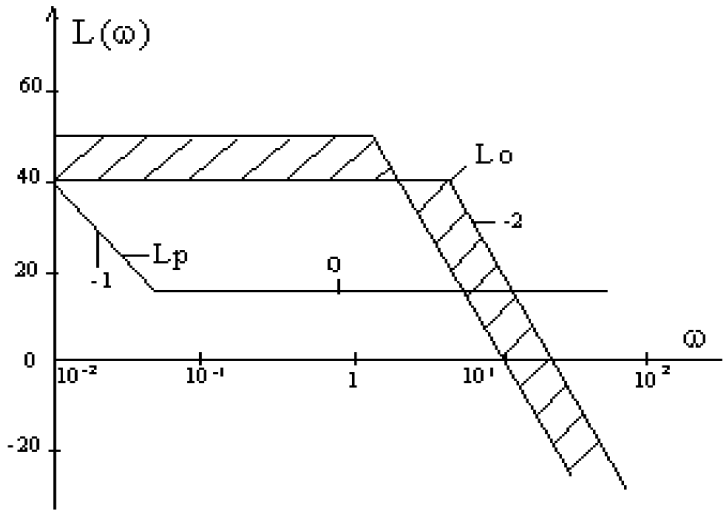


Рис. 3. ЛАЧХ разомкнутой системы ГД

Анализ показывает, что значение показателя колебательности системы m_c не может быть ниже показателя колебательности m_0 объекта, что также вытекает из анализа передаточной функции разомкнутой системы ГД (1).

$$W_P = W_P W_0 = \frac{k_p T_И p + 1}{T_И p} \cdot \frac{k_0}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1}, \quad (1)$$

где k_p, $T_И$ — параметры ПИ-регулятора, k_0, T_0, ξ — параметры объекта регулирования. Из выражения (1) следует, что принципиально невозможно в такой структуре обеспечить желаемую ЛАЧХ с участком 20 дБ/дек (рис. 3). Следовательно, характер процесса будет определяться только объектом. Очевидно, что та же картина будет наблюдаться и для пропорционального регулятора с $W_P = k_p$. Таким образом, для рассмотренной системы всегда справедливо неравенство $m_с < m_0$, что в физическом смысле означает, что колебательные процессы могут лишь усиливаться. При этом частота колебаний

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0}\sqrt{1 + k_0 k_p - \xi^2}$$

при $k_0 k_p > 1$ также возрастает.

Повышение устойчивости ГД

Рассмотрим теперь возможность снижения степени колебательности системы для случая идеального ПД-регулятора с передаточной функцией $W_{ПД}(p) = k_p(1 + T_д p)$, где $T_д$ — постоянная времени дифференциатора. Характеристическое уравнение для этого случая имеет вид

$$T_0^2 p^2 + \left(2\xi T_0 + k_0 k_p T_д\right) p + k_0 k_p + 1 = 0\,,$$

из которого находим связь между параметрами настройки $T_д$, k_p и $m_с$, m_0:

$$m_c = \frac{\frac{T_Д}{2\xi T_0} k_0 k_p + 1}{\left(\frac{m_0^2 + 1}{m_0^2}\left(k_0 k_p + 1\right) - \left(\frac{T_Д}{2\xi T_0} k_0 k_p + 1\right)^2\right)^{1/2}}. \qquad (2)$$

Из последнего выражения в результате анализа следует, что параметр $m_с$ может возрастать, т. е. колебательный процесс в системе будет затухать.

Из анализа ЛАЧХ следует, что настройку регулятора следует производить не при номинальной мощности ГД, а при минимальной мощности [3], [6]. В этом случае возрастание нагрузки, в силу снижения коэффициента усиления, будет приводить к возрастанию запаса устойчивости.

Для обеспечения апериодического переходного процесса, когда $m_c = \infty$, что соответствует случаю, когда знаменатель в формуле (2) равен нулю, из формулы (2) находим соотношение $\frac{m_0^2 + 1}{m_0^2}\left(k_0 k_p + 1\right) = \frac{T_Д}{2\xi T_0} k_0 k_p + 1$, которое позволяет описать взаимосвязь между параметрами регулятора и объекта.

Для обеспечения апериодического характера передаточного процесса при возмущении по нагрузке ГДГА регулятор ГД должен содержать дифференцирующую составляющую, поэтому для общности решения задачи настройки выбираем ПИД-регулятор. Для того чтобы выбрать коэффициенты ПИД-регулятора, можно использовать различные методы теории нелинейных систем или математическое моделирование. С инженерной точки зрения, проще второй способ, который позволяет в интерактивном режиме методом проб и ошибок выбрать подходящее значение коэффициентов [1], [7]. Для этого можно воспользоваться помощью пакета Signal Constraint среды MatLab.

Основными элементами замкнутой системы управления ГД на рис. 1 являются: объект регулирования; ПИД-регулятор; цепь обратной связи и узел сравнения. При заданной структуре объекта управления и известных неопределенностях его параметров необходимо найти значения коэффициентов *Kp*, *Ki* и *Kd* регулятора. Значения коэффициентов *Kp*, *Ki* и *Kd* регулятора выбраны в соответствии с методикой Зиглера — Николса, предназначенной для оптимальной настройки ПИД-регуляторов. Начальные значения настраиваемых параметров выбирались из расчёта нагрузки на валу ГД $0{,}8P_н$ без какой-либо оптимизации. В результате были получены следующие значения параметров: $Kp = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$; $Ki = 1{,}3 \cdot 10^{-4}$; $Kd = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$. Затем, в результате оптимизации

параметров ПИД-регулятора по приведённым соотношениям, были получены следующие параметры регулятора: $Kp = 1{,}7 \cdot 10^{-2}$; $Ki = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ и $Kd = 4{,}4 \cdot 10^{-3}$.

Результат отклика системы при выбранных параметрах показан на рис. 4,

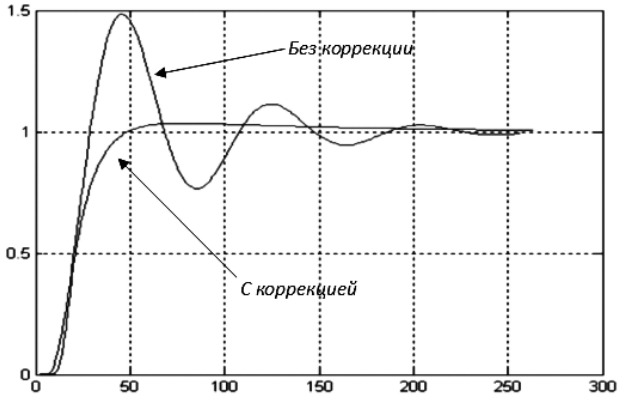


Рис. 4. Результаты настроек регулятора

где две кривых соответствуют переходным процессам в системе при начальных значениях (без коррекции) и значениям коэффициентов, найденных после оптимизации ПИД-регулятора (с коррекцией).

Автоматизация коррекции параметров регулятора ГДГА

При ПИД-регулировании сигнал управления зависит от разницы между измеренным параметром и заданным значением, а также от интеграла и производной от данной разности, т. е. от скорости изменения параметров. В конечном итоге ПИД-регулятор должен обеспечить такое состояние исполнительного устройства, при котором измеренный параметр равен заданному. Сигнал управления, который вырабатывает регулятор, определяется тем, насколько велико рассогласование, насколько долго сохраняется рассогласование (интегральная компонента) и, наконец, как быстро изменяется рассогласование (дифференциальная компонента).

Постановка задачи оптимизации. При заданной структуре объекта управления и известных неопределенностях его параметров найти значения коэффициентов *Kp*, *Ki*, *Kd* регулятора, при которых в представленной замкнутой структуре переходный процесс будет иметь параметры, заданные по умолчанию [7], [9].

Качество управления, которое обеспечивает ПИД-регулятор, в значительной степени зависит от того, насколько хорошо выбранные параметры регулятора соответствуют свойствам системы. Это означает, что ПИД-регулятор перед началом работы необходимо настроить.

Поскольку ГДГА характеризуются высокой нестабильностью частоты оборотов, которые, в свою очередь, зависят от нагрузки генератора (момента на валу ГД), необходимо корректировать коэффициенты регулятора в зависимости от режима работы ГДГА. На основе проведенного эксперимента были получены значения коэффициентов регулятора, которые при заданной мощности обеспечивают наилучший переходный процесс. Значения коэффициентов в зависимости от нагрузки *P* приводятся в следующей таблице:

Оптимальные значения коэффициентов регулятора ГДГА

P, %	K_p	K_i	K_d
0	0	0	0
20	$0{,}61 \cdot 10^{-2}$	$0{,}46 \cdot 10^{-4}$	$2{,}5 \cdot 10^{-3}$
40	$1{,}24 \cdot 10^{-2}$	$0{,}98 \cdot 10^{-4}$	$3{,}9 \cdot 10^{-3}$
60	$1{,}7 \cdot 10^{-2}$	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$	$4{,}4 \cdot 10^{-3}$
80	$1{,}84 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4{,}6 \cdot 10^{-3}$
100	$1{,}85 \cdot 10^{-2}$	$2{,}4 \cdot 10^{-4}$	$4{,}8 \cdot 10^{-3}$

Применение нечёткого регулятора при управлении ГДГА

ПИД-регулятор достаточно просто настраивается для работы с конкретным объектом и обеспечивает удовлетворительную стабилизацию регулируемого параметра при незначительных его отклонениях от заданной величины. Однако при резких изменениях режима работы управляемого объекта или при переходе его на другой режим работы качество переходного процесса в системе с ПИД-регулятором может оказаться неудовлетворительным. Возникает необходимость в использовании дополнительных устройств, корректирующих работу ПИД-регулятора. В системе управления оборотов ГДГА может использоваться технология нечеткой логики.

Функциональная схема системы автоматического управления на базе нечеткой логики (системы управления с нечетким регулятором (НР)) представлена на рис. 5. Схема состоит из устройства сравнения, нечеткого регулятора, объекта управления ГДГА и цепи обратной связи. НР включает три основных блока: блок фаззификации, блок формирования логического решения и блок дефаззификации.

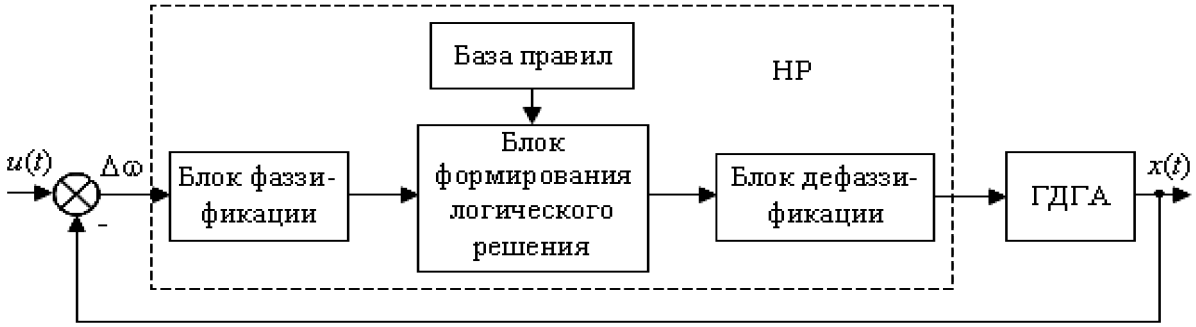


Рис. 5. Функциональная схема системы автоматического управления

В *блоке фаззификации* входные лингвистические переменные, такие как ошибка системы ε, скорость изменения (первая производная) ошибки ε', ускорение ошибки ε'', качественно характеризуются терм-множествами, которые описываются на универсальном множестве *u* функциями принадлежности μ(*u*). Текущие значения входных переменных преобразуются в лингвистические.

В *блоке формирования* логического решения на основе матрицы знаний (базы правил), записываются лингвистические правила вида: ЕСЛИ (исходная ситуация) ТО (ответная реакция).

В *блоке дефаззификации* полученная результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия на объект управления преобразуется в числовую величину, как правило, методом определения «центра тяжести» плоскости результирующей фигуры, лежащей под графиком результирующей функции принадлежности. Общее правило расчета абсциссы центра тяжести $S(u_c, \mu_c)$ участка площади, охватываемой результирующей функцией μ(*u*) в пределах изменения переменной *u* от u_1 до u_2, определяется по формуле

$$u_{\text{c}} = \frac{\int_{U_1}^{U_2} u\mu(u)du}{\int_{U_1}^{U_2} \mu(u)du}.$$

Переходя к численному интегрированию методом трапеций с шагом дискретизации u_0, получим

$$u_{\text{c}} = \frac{\frac{u_0\mu_0}{2} + \sum_{i=1}^{M-1} u_i\mu_i + \frac{u_2\mu_M}{2}}{\frac{\mu_0}{2} + \sum_{i=1}^{M-1} u_i + \frac{\mu_M}{2}},$$

где $u_0 = \dfrac{u_2 - u_1}{M}$ — шаг дискретизации; M — число дискрет на интервале $u_2 - u_1$; $i = 1, 2, 3 \ldots M - 1$.

При реализации регулятора с использованием нечеткой логики на микропроцессоре удобно выбирать трапециевидные и треугольные формы термов. Результирующая функция принадлежности в таком случае будет кусочно-линейной, и центр тяжести определяется выражением

$$u_c = \frac{\sum_{k=1}^{N}(a_{k+1} - a_k)[(2a_{k+1} + a_k)b_k + (2a_k - a_{k+1})b_k]}{3\sum_{k=1}^{N}(a_{k+1} - a_k)(b_{k+1} + b_k)},$$

где N — число вершин; a_k, b_k — координаты вершин результирующей фигуры.

Полученное значение u_c затем преобразуется в значение управляющего воздействия на объект управления путем обратного отображения величины u_c с единого универсального множества на диапазон изменения $[m_{\min}, m_{\max}]$, где m — лингвистическая переменная управляющего воздействия на объект.

В настоящей работе использовался нечеткий регулятор «Мамдани», спроектированный в MatLab. Пакет Fuzzy Logic Toolbox в MatLab обладает простым интерфейсом, позволяющим легко проектировать и диагностировать нечеткие модели.

В качестве входных переменных использовались текущее значение мощности, потребляемой от ГДГА, а также скорость изменения мощности [9] – [11]. Для каждой переменной заданы лингвистические термы, соответствующие некоторым диапазонам четких значений. Для входной переменной «мощность» (P) предполагается использовать три терма: PL — положительное малое, PM — положительное среднее, PH — положительное большое. Для входной переменной «скорость изменения мощности» (dP) используется три терма: NL — отрицательное малое, Z — близкое к нулю, PL — положительное малое. На рис. 6 представлен вид функций принадлежности переменных «мощность» и «скорость изменения мощности соответственно».

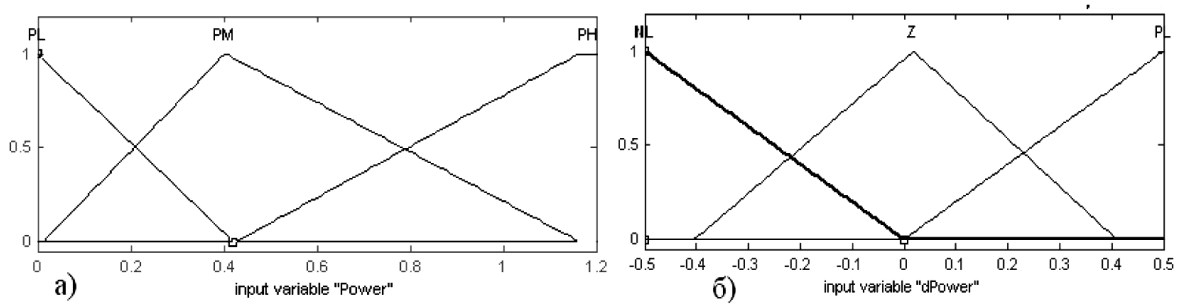


Рис. 6. Вид функций принадлежности для переменных «мощность» (*а*); «скорость изменения мощности» (*б*)

Аналитическая формула треугольной функции имеет вид

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, x \le a; \\ \dfrac{x-a}{b-a}, a \le x \le b; \\ \dfrac{c-x}{c-b}, b \le x \le c; \\ 0, c \le x. \end{cases}$$

где a, b, c — параметры функций принадлежности.

База правил имеет вид:

Если $P = PL$ и $dP = NL$ То $Kd = PL$, $Kp = PL$, $Ki = PL$

Если $P = PL$ и $dP = Z$ То $Kd = PL$, $Kp = PL$, $Ki = PL$

Если $P = PL$ и $dP = PL$ То $Kd = PL$, $Kp = PM$, $Ki = PM$

Если $P = PM$ и $dP = NL$ То $Kd = PM$, $Kp = PM$, $Ki = PL$

Если $P = PM$ и $dP = Z$ То $Kd = PM$, $Kp = PM$, $Ki = PM$

Если $P = PM$ и $dP = PL$ То $Kd = PH$, $Kp = PM$, $Ki = PM$

Если $P = PH$ и $dP = NL$ То $Kd = PM$, $Kp = PH$, $Ki = PM$

Если $P = PH$ и $dP = Z$ То $Kd = PH$, $Kp = PH$, $Ki = PH$

Если $P = PH$ и $dP = PL$ То $Kd = PH$, $Kp = PH$, $Ki = PH$

Диапазон изменения выходов:

$Kp = [Kp_{min}; Kp_{max}] = [0; 0{,}02]$,

$Ki = [Ki_{min}; Ki_{max}] = [0; 0{,}00025]$,

$Kd = [Kd_{min}\, Kd_{max}] = [0; 0{,}005]$.

Нелинейная зависимость коэффициента дифференциального звена регулятора от значений на входе нечеткого регулятора показана на рис. 7.

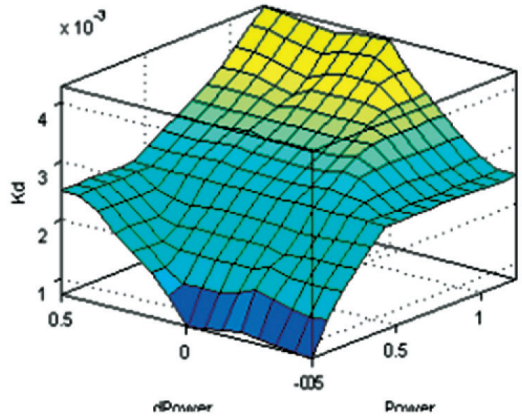


Рис. 7. Поверхность нечёткого вывода регулятора для дифференциальной части

Для коэффициента *Kp* пропорциональной составляющей поверхность нечеткого вывода имеет вид, показанный на рис. 8.

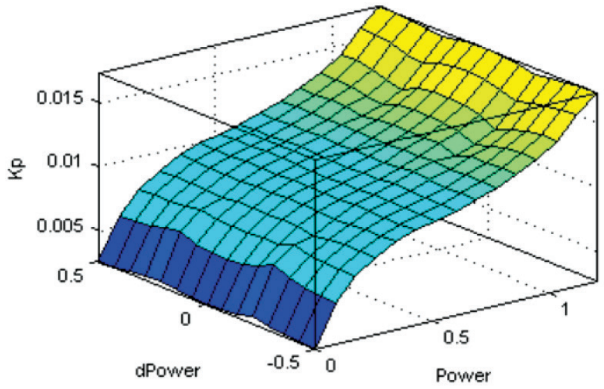


Рис. 8. Поверхность нечёткого вывода регулятора для пропорциональной части

Для коэффициента *Ki* интегральной составляющей поверхность нечеткого вывода имеет вид, показанный на рис. 9.

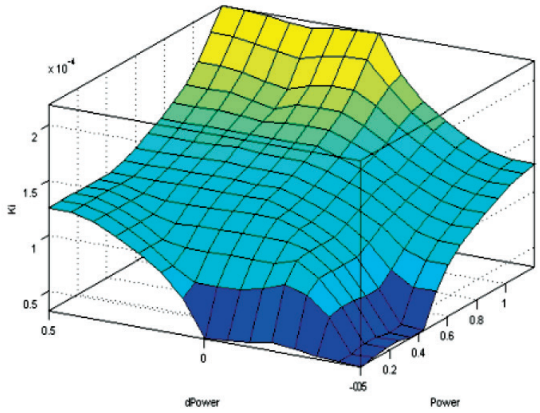


Рис. 9. Поверхность нечёткого вывода регулятора для интегральной части

Нечеткие регуляторы реализуются на практике, как правило, в форме программного обеспечения высокого уровня (например, на языке С++), что обеспечивает большую гибкость при их настройке. Метод корректирования коэффициентов автоматического регулятора оборотов ГДГА с помощью нечеткого регулятора является эффективным, так как позволяет расширить диапазон устойчивой работы ГД, вплоть до аварийных режимов. По существу, введение нечеткого регулятора для подстройки коэффициентов традиционного ПИД-регулятора в функции параметров текущего режима работы ГДГА придает системе управления оборотами ГД свойство адаптивности.

Выводы

1. Анализ работы АЭЭС позволил установить, что коммутационные процессы, обусловленные подключением и отключением нагрузок, приводят к колебаниям напряжений и частоты сети, спектр которых находится в том же частотном диапазоне, что и спектр колебаний оборотов ГДГА, что способствует возникновению обменных колебаний мощности между параллельно работающими генераторами.

2. На основе метода ЛАЧХ обоснована необходимость использования дифференциальной составляющей в регуляторе дизеля и установлена аналитическая зависимость между параметрами регулятора и дизеля, позволяющая устанавливать допустимую степень колебательности системы.

3. На основе оптимизации параметров ПИД-регулятора для каждой из нагрузок определены их нелинейные зависимости от величины нагрузки на валу ГДГА.

4. Комплекс аппаратно-программных средств управления параметрами ПИД-регулятора ГДГА с помощью подстройки его коэффициентов нечётким регулятором позволит оптимизировать динамические режимы регулирования во всем диапазоне нагрузок и, согласно расчётам, в 15 – 20 раз снизит дисперсию колебаний оборотов вала ГД.

Список литературы

1. *Zhilenkov A.* Investigation performance of marine equipment with specialized information technology / A. Zhilenkov, S. Chernyi // Procedia Engineering. — 2015. — Vol. 100. — P. 1247–1252.

2. *Лукас В. А.* Теория автоматического управления / В. А. Лукас. — М.: Недра, 1990.

3. *Chernyi S.* Modeling of complex structures for the ship's power complex using XILINX system / S. Chernyi, A. Zhilenkov // Transport and Telecommunication. — 2015. — Vol. 16 (1). — P. 73–82.

4. *Моцохейн Б. И.* Электропривод, электрооборудование и электроснабжение буровых установок / Б. И. Моцохейн, Б. М. Парфенов, В. М. Шпилевой. — Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. нефтегаз. ун-та, 1999. — 264 с.

5. *Мирзаджанзаде А. Х.* Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Нелинейность. Неравномерность. Неоднородность / А. Х. Мирзаджанзаде, М. М. Хасанов, Р. Н. Бахтизин. — Уфа: ГИЛЕМ. — 1999. — 464 с.

6. *Жиленков А. А.* Применение нейронечёткого моделирования для задач идентификации многокритериальности в транспортной отрасли / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Вестник Самарского государственного университета путей и сообщений. — 2014. — № 1 (23). — С. 104–110.

7. *Черный С. Г.* Идентификация внешних параметров сигналов для экспертных подсистем в составе устройств судовых электроэнергетических систем / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Научно-технический вестник СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2014. — № 3 (198). — С. 28–36.

8. *Ильиных А. В.* России есть возможности для изготовления бурового оборудования для континентального шельфа / А. В. Ильиных // Тезисы выступления главного конструктора ЗАО «Уралмаш — Буровое оборудование» 2005 года на заседании рабочей группы ТПП РФ по развитию производства отечественного оборудования для работы на шельфе. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.derrick.ru/?f=z&id=8407 (дата обращения: 17.04.2015).

9. *Черный С. Г.* Интеллектуальная поддержка принятия решений при оптимальном управлении для судовых электроэнергетических систем / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 68–75.

10. *Седов В. А.* Нечеткая система удержания судна на курсе / В. А. Седов, Н. А. Седова, В. С. Перечесов // Южно-Сибирский научный вестник. — 2012. — № 1. — С. 86–87.

11. *Жиленков А. А.* Перспективные пути повышения эффективности диагностирования параметров надежности эксплуатации морского бурового оборудования / А. А. Жиленков, А. А. Железняк, С. Г. Черный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 90–95.

УДК 681.51

А. А. Чертков,
канд. техн. наук, доц.

ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ГРУППОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

AN ITERATIVE ALGORITHM FOR CHOOSING THE OPTIMAL STRATEGY OF GROUP INTERACTION FOR MOVING OBJECTS

Создание эффективных алгоритмов оптимизации группового взаимодействия подвижных объектов экстремальными методами на основе компьютерных моделей представляет собой самостоятельную научную проблему, получившую важные приложения на водном транспорте и в других отраслях народного хозяйства.

Проблема выбора наиболее эффективной стратегии группового взаимодействия подвижных объектов (судов технического или транспортного флота, находящихся на внутренних водных путях) связана с решением оптимизационных многопараметрических задач, характеризующихся высокой размерностью, сложной зависимостью оценок эффективности (ценности) задач от технологических параметров подвижных объектов, внешних условий, что значительно усложняет разработку адекватных моделей и проведение машинных экспериментов. В связи с этим в решении данной проблемы, особенно в случае функционирования подвижных объектов в заранее неизвестной среде, отсутствуют общие подходы и методики.

Ключевым вопросом в проблеме создания систем группового взаимодействия подвижных объектов является разработка таких алгоритмов и программ функционирования их в динамически изменяющейся среде, которые бы обеспечивали экстремальное значение целевого функционала в достижении заданной цели. В статье рассмотрен итерационный алгоритм планирования групповых действий подвижных объ-

ектов при выборе целей. Алгоритм основан на использовании итерационной процедуры оптимизации группового взаимодействия подвижных объектов по выбору наиболее эффективной стратегии в достижении поставленной цели. На основе алгоритма разработана программа, реализуемая в кодах MatLab, и рассмотрен конкретный пример распределения целей между роботами, при котором обеспечивается максимум целевого функционала.

Creating effective group communication optimization algorithms for intelligent robots extreme methods based on computer models is an independent scientific problem, which has important applications in water transport and other economic sectors.

The problem for choosing the most effective group communication strategy for intelligent robots, connected optimal processes high dimensionality, a complex dependence of effectiveness evaluation (value) robots technological parameters tasks, the external environment, which considerably complicates machine experiments adequate models development. Therefore, in dealing with this problem, particularly in the case unknown environment robots, there are no common approaches and methodologies.

The key to creation group communication robots systems is the algorithms and programs development their dynamically changing environment that would be ensure extreme target functionality value in meeting the specified objectives.

Optimal planning group actions robots algorithm distribution targets is considered. The algorithm is based on an iterative procedure optimization of group communication robots for selecting the most effective strategy to achieve this goal. The program in MatLab code is developed for algorithm realization. Specific example for which the calculated selecting targets and choosing a solution that provides maximum target functional is presented.

Ключевые слова: алгоритм, группа, подвижные объекты, планирование групповых действий, целераспределение, целевой функционал, оценка эффективности, итерационная процедура.

Key words: the algorithm, group, moving objects, planning group activities, distribution targets, the target functional, effectiveness, evaluation, iteration procedure.

ПРОБЛЕМЕ создания моделей подвижных объектов посвящено достаточно большое число исследований, проводимых как в нашей стране, так и за рубежом, начиная с середины 60-х гг. прошлого века. Основными областями применения подвижных объектов могут быть такие, как распознавание объектов и сцен, формирование моделей окружающей среды, планирование маршрутов движения и последовательности действий для достижения поставленной цели, управление динамикой движения объектов и др. [1] – [3].

Использование одиночных объектов не обеспечивает решение сложных задач при функционировании их в экстремальных ситуациях. Преимущества использования группы подвижных объектов очевидны: это и большой радиус действий, достигаемый за счет рассредоточения объектов по всей рабочей зоне, и расширенный набор выполняемых функций, и, наконец, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет оперативного перераспределения целей между объектами группы в случае выхода из строя некоторых из них.

В настоящее время, в связи с развитием компьютерных технологий, проблеме группового взаимодействия подвижных объектов продолжает уделяться большое внимание. Вместе с тем, в решении данной проблемы, особенно при функционировании объектов в заранее неизвестной среде, не определены общие подходы и методики. Ключевым вопросом проблемы создания систем группового взаимодействия подвижных объектов является разработка таких алгоритмов и программ функционирования их в динамически изменяющейся среде, которые могут обеспечивать определение экстремальных значений целевых функционалов при достижении заданных целей.

Предлагаются алгоритм и компьютерная программа оптимального планирования групповых действий подвижных объектов, оснащенных бортовыми вычислительными устройствами, предназначенными для обеспечения функционирования управляемых объектов в реальном времени.

В общем виде задачу распределения целей между объектами можно сформулировать следующим образом. Предположим, что существует некоторое множество взаимосвязанных задач $Z_i \in \{Z\}$, обладающих ценностью P, определяющих различные целевые стратегии подвижных

объектов «коллектива». Пусть существует «коллектив», состоящий из n объектов $R_j(j=\overline{1,n})$, выполняющий задачи по выбору наиболее эффективной стратегии из множества

$$S_j = < s_{1j}, s_{2j}, ..., s_{vj} >. \quad (1)$$

Задача состоит в получении такого распределения подвижных объектов $R_j(j=\overline{1,n})$ на множестве взаимосвязанных задач $\{Z\}$, при котором достигается экстремум функционала Y:

$$Y = F(S, Z, Q), \quad (2)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{k} P_i, \quad S = Z_k, \quad Z_k \in Z, \quad Z = \{Z_i \mid P\}, \quad n > m,$$

где $Z_i \in \{Z\}$ — цель подвижного объекта $R_j(j=\overline{1,n})$; P — вектор-функция оценок эффективности (ценности) задач. Если под точками пространства целей $\{Z\}$ понимают, например, координаты точек расположения целей, то формулируют, соответственно, задачу нанесения максимального ущерба конкуренту или задачу максимального покрытия множества целевых задач**.** Если же под точками пространства целей $\{Z\}$ имеют в виду различные подмножества запросов на обслуживание или различные подмножества задач из некоторого потока, то приходят, соответственно, к задаче распределения запросов между объектами или распределения потока задач в компьютерной сети [4] – [6].

Для учета эффективности выполнения задач управления группой подвижных объектов, вводится параметр мощности стратегии выбора i-й задачи j-м подвижным объектом $\gamma_{i,j}$. С учетом эффективности конкретизируем задачу: для группы мобильных объектов R необходимо выбрать такую стратегию $S^* \in \{S\}$, когда каждый объект R_j по стратегии выбирает наиболее ценную задачу на дискретном отрезке времени Δt

$$\max(S) = S^*,$$

$$\begin{aligned} S^* &= \{S_1, S_2, ..., S_{i-1}, S_i\}, \qquad i \in \{R\}, \\ S_i &= \{Z_k, ..., Z_m\}, \quad k, m \in \{Z\}, \\ W_{Z_j} &= f(P_j, \gamma_{i,j}) \to \max, \quad \Delta t \in T. \end{aligned} \quad (3)$$

Задача (3) решается на основе математического аппарата многокритериальной оптимизации. Анализ методов многокритериальной оптимизации выявил целесообразность использования метода справедливых компромиссов для поиска Парето-оптимального множества стратегий, набора стратегий с максимальной суммарной мощностью W [7], [8].

Введем меру относительного изменения эффективности стратегий для каждого k-го подвижного объекта группы R при переходе от множества стратегий D_i к D_j

$$\Delta\tilde{\gamma}_k(D_i, D_j) = \frac{\Delta\gamma_k(D_i, D_j)}{\left| \max\limits_{D \in (D_i, D_j)} \gamma_k(D) \right|}, \quad k \in [1, S]; \quad (4)$$

где $\Delta\gamma_k(D_i, D_j) = \gamma_k(D_i) - \gamma_k(D_j)$ — абсолютное изменение значений суммарной мощности стратегий $\gamma_k(W)$ при переходе от множества стратегий D_i к D_j.

Суммарное снижение мощности для группы подвижных объектов при переходе от множества стратегий D_i к множеству D_j определяется как

$$\begin{cases} \Delta\tilde{\gamma}_{\min}(D_i, D_j) = \sum\limits_{n}^{k=1} \Delta\tilde{\gamma}_k(D_i, D_j); \\ \Delta\tilde{\gamma}_k(D_i, D_j) < 0. \end{cases} \quad (5)$$

где n — количество объектов в группе R.

Множество стратегий для группы объектов D_j эффективнее множества D_i, если выполняется условие

$$D_j \to D_i, \text{ если } \left|\Delta\tilde{\gamma}_{\max}(D_i, D_j)\right| > \left|\Delta\tilde{\gamma}_{\min}(D_i, D_j)\right|. \quad (6)$$

При выполнении условия (5) происходит переход от выполнения группой объектов R множества стратегий D_i к выполнению множества D_j.

Наглядным примером сформулированной задачи распределения целей может служить модельная задача, в которой под состояниями подвижных объектов и целей понимаются их координаты, а под эффектом — ущерб, наносимый конкуренту. Поэтому рассмотрим ее подробнее, приняв условия (1) и (2) для того же коллектива из n объектов $R_j(j=\overline{1,n})$. Предположим также, что эффект от достижения объектом R_j цели $X_i \in \{X\}$ определяется значением некоторой оценки эффективности

$$d_{ji} = F(S_j, X_i, K_i), \quad (7)$$

где K_i — приоритет цели X_i.

Кроме того, введем ограничение, заключающееся в том, что число объектов в группе n_i, одновременно направляемых на одну и ту же цель X_i, не должно превышать некоторой величины $n_i^{\max}$, т. е.

$$n_i \le n_i^{\max} (i=\overline{1,m}). \quad (8)$$

Тогда задача распределения целей для группы подвижных объектов состоит в следующем: необходимо таким образом распределить (назначить) объекты $R_j(j=\overline{1,n})$ по целям $X_i(i=\overline{1,m})$, чтобы получить с учетом ограничений (5) максимальный суммарный эффект

$$Y = \sum_{j=1}^{n} d_{ji}, \quad (9)$$

где i — номер цели X_i, выбранной j-м мобильным объектом R_j с учетом ограничения (5).

С введением ограничения (8) на число подвижных объектов, направляемых на одну цель, исходная задача целераспределения (1) – (3) обретает существенную сложность. Так, величина $n_i^{\max}$, ограничивающая число подвижных объектов, одновременно направляемых на одну и ту же цель из множества целей {X}, важна с точки зрения стратегии поведения группы. Действительно, если, например, необходимо достичь как можно больше целей из множества {X}, то величину $n_i^{\max}$ необходимо задать как можно меньшей (например, $n_i^{\max} = 1$). В результате подвижные объекты будут стараться «рассредоточиться» по целям. Если же для некоторых целей установить величину $n_i^{\max}$ больше, чем для других, то это будет давать объектам из группы возможность сосредоточить «большее внимание» на этих целях. Иными словами, величины $n_i^{\max}$ $(i=\overline{1,m})$ должны выбираться, исходя из требуемой стратегии управления группой объектов (например, в зависимости от приоритета целей или от соотношения числа объектов и целей).

В данной постановке задача целераспределения (7) – (9) может быть решена с применением метода коллективного планирования действий [9] – [11], [12], согласно которому проблема разделяется на две основные части:

во-первых, необходимо разработать алгоритм выбора очередной цели j-м объектом группы в k-м итерационном цикле оптимизации коллективного решения;

во-вторых, разработать алгоритмы информационных обменов (взаимодействий) между объектами в группе в процессе реализации очередного итерационного цикла.

Рассмотрим алгоритмы более подробно.

1. Алгоритм выбора цели отдельным подвижным объектом группы. Основная идея метода коллективного планирования действий состоит в том, что в каждом итерационном цикле оптимизации коллективного решения каждый объект $R_j(j=\overline{1,n})$ выбирает такое свое допустимое текущее действие, которое вносит максимально возможный вклад в достижение общей (коллективной) цели.

Для сформулированной задачи распределения целей между подвижными объектами общая (коллективная) цель — это достижение максимума суммарного эффекта (9). Поэтому в очередном цикле оптимизации коллективного решения объект R_j должен выбирать такую цель, которая дает максимальное приращение суммарного эффекта

$$\Delta Y_j = Y_j^{k+1} - Y_{j-1}^{k+1}, \tag{10}$$

где Y_j^{k+1} — значение суммарного эффекта, полученного в (k + 1)-м (k = 0, 1, 2, ...) итерационном цикле в результате выбора объектом R_j i-й цели X_{ij}^{k+1}; Y_{j-1}^{k+1} — значение суммарного эффекта, полученное в (k + 1)-м цикле итерации в результате выбора i-й цели $X_{i(j-1)}^{k+1}$ объектом $R_{j\text{-}1}$.

С учетом (6), последнее выражение можно переписать в следующем виде:

$$\Delta Y_j^{k+1} = \left(\sum_{l=1}^{j} d_{li}^{k+1} + \sum_{l=j+1}^{n} d_{li}^{k} \right) - \left(\sum_{l=1}^{j-1} d_{li}^{k+1} + \sum_{l=j}^{n} d_{li}^{k} \right) = d_{ji}^{k+1} - d_{ji}^{k},$$

где d_{ji}^{k} — значение оценки эффективности выбора объектом R_j цели X_{ij}^{k} в k-м цикле итерации; d_{ji}^{k+1} — значение оценки эффективности выбора объектом R_j новой цели на (k + 1)-м цикле итерации.

Таким образом, в каждом итерационном цикле оптимизации коллективного решения объект $R_j (j = \overline{1,n})$ должен выбирать цель X_{ij}, для которой величина оценки эффективности в наибольшей степени превышает величину оценки эффективности цели, выбранной им в предыдущем цикле. Если значения оценок d_{ji} ($j = \overline{1,n},\ i = \overline{1,m}$) известны заранее и не меняются в процессе выполнения итерационной процедуры оптимизации коллективного решения, то задача существенно упрощается. В этом случае для достижения максимального приращения суммарного эффекта в очередном итерационном цикле оптимизации коллективного решения объект R_j, очевидно, должен выбрать ту цель X_i из множества $\{X\}$, для которой значение оценки эффективности d_{ji} максимально. При этом необходимо учитывать и ограничения, накладываемые на число подвижных объектов, направленных на одну и ту же цель. Если, например, объект R_j выбирает цель X_i, при этом общее число подвижных объектов, выбравших ту же цель, становится равным $n_i^{\max}$, то остальные объекты группы уже не будут иметь возможности выбрать в качестве своей цели данную цель X_i. В то же время, может оказаться, что выбор цели X_i некоторым другим объектом $R_f (f \neq j)$ обеспечивает больший эффект (т. е. вносит большее приращение в функционал (9)) по сравнению с объектом R_j. Поэтому в процессе выбора подвижными объектами целей необходимо каким-то образом осуществлять сравнение эффектов, вносимых различными объектами коллектива в результате выбора той или иной цели.

Для этого вводится в рассмотрение некоторая матрица D, содержащая n строк и m столбцов, где n — число объектов в группе, а m — число целей в множестве $\{X\}$. Примем, что индексы $j = \overline{1,n}$, будут соответствовать номерам строк матрицы D, а индексы $i = \overline{1,m}$ — номерам столбцов матрицы D. Будем считать, что элементы матрицы D, стоящие на пересечении j-й строки и i-го столбца определяются выражением (4), т. е. равны эффекту d_{ji}, получаемому в результате выбора роботом R_j цели X_i.

В дальнейшем матрицу $D = [d_{ji}]$ ($j = \overline{1,n},\ \ i = \overline{1,m}$), будем называть *матрицей эффективности*. С использованием матрицы эффективности D процедуру выбора цели подвижным объектом R_j в очередном итерационном цикле оптимизации коллективного решения можно организовать следующим образом. Предположим, что каждый объект из группы обладает полной информацией обо всех элементах матрицы эффективности D. Тогда при выборе цели объектом R_j в очередном итерационном цикле оптимизации коллективного решения сначала в строке матрицы D, соответствующей его номеру j, осуществляется поиск максимального элемента d_{ji}. Минимальное значение индекса i этого максимального элемента соответствует номеру цели с наименьшим номером, выбор которой объектом R_j вносит не меньший вклад в суммарный эффект (9), чем выбор других целей.

В то же время, как уже отмечалось, подобный выбор *i*-й цели *j*-м подвижным объектом может оказаться весьма далеким от оптимального с точки зрения достижения максимума суммарного эффекта *Y*. Поэтому полученное значение *i* фиксируется, и выполняется проверка, является ли выбранное значение d_{ji} максимальным в *i*-м столбце. Таким образом, проверяется, имеются ли в коллективе объекты, для которых величина эффекта от достижения данной цели будет больше, т. е. имеются ли более эффективные «претенденты» на *i*-ю цель. Если таковых нет, цель с номером *i* «закрепляется» за *j*-м подвижным объектом, если его номер минимален из всех объектов группы, имеющих тот же эффект. В противном случае объект R_j «отказывается» от выбора цели в текущем итерационном цикле.

Если *j*-й объект в текущем итерационном цикле выбрал некоторую цель, этот выбор считается окончательным до завершения итерационной процедуры. Подвижный объект, выбравший цель, передает ее и свой номер другим объектам из группы. Те, в свою очередь, должны исключить объект R_j из списка «претендентов» на оставшиеся цели. Наиболее просто это осуществляется путем присвоения элементам d_{ji} *j*-й строки матрицы *D* нулевых значений. Таким образом, после каждого итерационного цикла список «участников» целераспределения сокращается.

После каждого выбора некоторой цели каким-либо объектом наращиваются счетчики подвижных объектов, выбравших эту цель, и, если, например, *i*-я цель выбрана $n_i = n_i^{\max}$ объектами, то эту цель необходимо также исключить из списка распределяемых целей до конца итерационной процедуры. Это осуществляется путем присвоения элементам d_{ji} *i*-го столбца матрицы *D* нулевых значений всеми объектами, продолжающими участвовать в процедуре распределения целей.

Если в процессе целераспределения оказывается, что $n_i = n_i^{\max}$, то *i*-ю цель будем называть *обеспеченной*; если $n_i < n_i^{\max}$, то *i*-я цель считается *необеспеченной*.

Процедура распределения целей продолжается до тех пор, пока матрица *D* полностью не «обнулится». Если $n < \sum_{i=1}^{m} n_i^{\max}$ (т.е., число объектов меньше, чем необходимо для решения целевой задачи), все подвижные объекты «выберут» цели, а часть целей останется необеспеченной. Если же $n > \sum_{i=1}^{m} n_i^{\max}$, то все цели будут распределены и обеспечены, но для части подвижных объектов цели не будут определены.

2. Алгоритм информационных взаимодействий в «коллективе» подвижных объектов. Для реализации изложенного алгоритма выбора цели каждый подвижный объект группы должен располагать информацией о том, какие цели уже выбраны другими объектами группы. На основе этой информации объект R_j должен осуществлять модификацию имеющихся у него массивов *L* и *N*, а также матрицы *D* для того, чтобы исключить объекты, уже сделавшие свой выбор, из процесса целераспределения. Для этого, в случае выбора объектом R_r некоторой цели X_i, он должен передать всем другим объектам группы сообщение вида $< r, S_r^0, l_r >$, т.е. свой номер *r*, текущее состояние S_r^0 и номер выбранной им цели l_r. Получив данное сообщение, остальные подвижные объекты группы модифицируют свои массивы *N* и *L*. При этом r-му элементу своих массивов $L = [l_j, j = \overline{1,n}]$ они присваивают значение l_r. Для формирования массива счетчиков выбранных целей *N* каждым подвижным объектом достаточно просмотреть массив *L* и выполнить несложную процедуру подсчета его ненулевых элементов, так как в исходном состоянии всем элементам массива *L* присваиваются нулевые значения, а в процессе выполнения итерационной процедуры эти массивы модифицируются в каждом цикле.

Для демонстрации практической реализации рассмотренного алгоритма разработана программа, составленная в кодах MatLab, позволяющая получить решение, соответствующее оптимальному распределению целей в группе подвижных объектов. Приводится пример с подробным решением для одного итерационного цикла процедуры оптимизации целераспределения.

Пример. Пусть имеется коллектив из 24 подвижных объектов и определены десять целей, т. е. $n = 24$, $m = 10$. Матрица оценок эффективности D_0 и массив $N^{\max}$ имеют следующий вид:

$$D_0 = \begin{bmatrix} 5.1 & 5.8 & 8.9 & 0.4 & 5.7 & 5.6 & 3.4 & 0.9 & 0.5 & 0.7 \\ 8.8 & 8.2 & 9.8 & 6.4 & 0.5 & 8.5 & 1.8 & 3.1 & 6.7 & 0.9 \\ 5.9 & 8.8 & 7.7 & 2.8 & 9.3 & 3.5 & 2.1 & 4.6 & 6.0 & 8.0 \\ 1.5 & 9.8 & 5.8 & 5.4 & 7.3 & 4.5 & 9.1 & 1.0 & 5.3 & 9.4 \\ 2.0 & 0.0 & 9.2 & 7.0 & 7.4 & 0.5 & 6.8 & 10.0 & 7.3 & 6.8 \\ 4.1 & 8.7 & 5.8 & 5.0 & 0.6 & 1.8 & 4.7 & 3.3 & 7.1 & 1.3 \\ 7.5 & 6.1 & 0.2 & 5.4 & 8.6 & 6.6 & 9.1 & 3.0 & 7.8 & 7.2 \\ 8.2 & 9.8 & 1.2 & 4.5 & 9.3 & 3.3 & 1.0 & 0.6 & 2.8 & 1.1 \\ 7.9 & 5.3 & 8.6 & 1.2 & 9.8 & 8.9 & 7.5 & 2.9 & 6.9 & 1.2 \\ 3.2 & 4.8 & 4.8 & 4.9 & 8.6 & 1.2 & 7.4 & 0.5 & 5.6 & 6.4 \\ 5.3 & 8.0 & 8.4 & 8.5 & 7.9 & 9.8 & 5.6 & 5.1 & 4.0 & 3.3 \\ 0.9 & 2.3 & 2.1 & 8.7 & 5.1 & 5.4 & 1.8 & 7.6 & 0.6 & 6.5 \\ 1.1 & 5.0 & 5.5 & 2.7 & 1.8 & 7.1 & 6.0 & 6.3 & 7.8 & 7.5 \\ 1.4 & 9.0 & 6.3 & 2.1 & 4.0 & 10.0 & 3.0 & 0.9 & 3.4 & 5.8 \\ 6.8 & 5.7 & 0.3 & 5.6 & 1.3 & 2.8 & 1.3 & 0.8 & 6.1 & 7.4 \\ 5.0 & 8.5 & 6.1 & 6.4 & 0.3 & 4.1 & 2.1 & 7.8 & 7.4 & 2.3 \\ 1.9 & 7.4 & 3.6 & 4.2 & 9.4 & 4.6 & 8.9 & 9.1 & 1.0 & 7.3 \\ 5.0 & 5.9 & 0.5 & 2.1 & 3.0 & 7.6 & 0.7 & 5.3 & 1.3 & 9.7 \\ 1.5 & 2.5 & 4.9 & 9.5 & 3.0 & 8.2 & 2.4 & 1.1 & 5.5 & 8.6 \\ 0.5 & 6.7 & 1.9 & 0.8 & 3.3 & 1.0 & 0.5 & 8.3 & 4.9 & 0.8 \\ 8.5 & 0.8 & 1.2 & 1.1 & 4.7 & 1.8 & 4.4 & 3.4 & 8.9 & 3.7 \\ 5.6 & 6.3 & 2.1 & 1.4 & 6.5 & 3.6 & 0.1 & 3.0 & 8.0 & 3.7 \\ 9.3 & 6.6 & 1.5 & 1.7 & 0.3 & 0.6 & 9.0 & 7.5 & 7.3 & 6.9 \\ 7.0 & 7.3 & 1.9 & 6.2 & 8.4 & 5.2 & 2.0 & 0.1 & 0.5 & 6.0 \end{bmatrix}$$

$$N_{\max} = [3\ \ 1\ \ 2\ \ 1\ \ 3\ \ 2\ \ 1\ \ 2\ \ 3\ \ 2];$$

Необходимо распределить заданные цели между подвижными объектами так, чтобы функционал (9) имел максимальное значение.

Решение. В соответствии с изложенным алгоритмом образуем вспомогательные (в начале процедуры — нулевые) массивы

$$N = [0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0]$$

$$\text{и}\quad L = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0],$$

в которых число элементов равно числу целей и числу подвижных объектов, соответственно, а также переменную матрицу D, которая в начале процесса равна D_0, т. е. $D = D_0$.

В рассматриваемом случае $L = [l_j, j = \overline{1, n}]$, т. е. меньше числа объектов в группе (коллективе). Следовательно, по окончании работы алгоритма все цели должны быть обеспечены. Далее представлены результаты работы вычислительного алгоритма в виде фрагмента программы, отображающей первый цикл итерационного процесса.

Фрагмент программы завершается вычислением массивов L и N распределения объектов по номерам выбранных ими целей, представленных в виде элементов вектора N:

$$L = [0\ 3\ 0\ 2\ 8\ 0\ 7\ 0\ 5\ 0\ 0\ 0\ 0\ 6\ 0\ 0\ 5\ 10\ 4\ 8\ 9\ 9\ 1\ 0]$$

$$N = [1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 2\ \ 1\ \ 1\ \ 2\ \ 2\ \ 1]$$

$$D = \begin{bmatrix}
5.1 & 0 & 8.9 & 0 & 5.7 & 5.6 & 0 & 0 & 0.5 & 0.7 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
5.9 & 0 & 7.7 & 0 & 9.3 & 3.5 & 0 & 0 & 6.0 & 8.0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
4.1 & 0 & 5.8 & 0 & 0.6 & 1.8 & 0 & 0 & 7.1 & 1.3 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
8.2 & 0 & 1.2 & 0 & 9.3 & 3.3 & 0 & 0 & 2.8 & 1.1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
3.2 & 0 & 4.8 & 0 & 8.6 & 1.2 & 0 & 0 & 5.6 & 6.4 \\
5.3 & 0 & 8.4 & 0 & 7.9 & 9.8 & 0 & 0 & 4.0 & 3.3 \\
0.9 & 0 & 2.1 & 0 & 5.1 & 5.4 & 0 & 0 & 0.6 & 6.5 \\
1.1 & 0 & 5.5 & 0 & 1.8 & 7.1 & 0 & 0 & 7.8 & 7.5 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
6.8 & 0 & 0.3 & 0 & 1.3 & 2.8 & 0 & 0 & 6.1 & 7.4 \\
5.0 & 0 & 6.1 & 0 & 0.3 & 4.1 & 0 & 0 & 7.4 & 2.3 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
7.0 & 0 & 1.9 & 0 & 8.4 & 5.2 & 0 & 0 & 0.5 & 6.0
\end{bmatrix}$$

Как видно из построенных векторов L и N, в первом цикле реализации алгоритма второй объект выбирает третью, четвертый — вторую, пятый — восьмую, седьмой — седьмую, девятый и семнадцатый — пятую, четырнадцатый — шестую, восемнадцатый — десятую, девятнадцатый — четвертую, двадцатый — восьмую, двадцать первый и двадцать второй — девятую, двадцать третий — первую цели. Остальные подвижные объекты «отказываются» от выбора, так как в этом цикле для других объектов выбор соответствующих целей более эффективен. В конце первого цикла происходит обмен информацией между объектами группы и формирование массива L, модификация массива N и матрицы D в соответствии с предложенным алгоритмом.

Так как часть подвижных объектов сделала свой выбор, соответствующие им строки в матрице D обнулены. Значения элементов массива L соответствуют номерам выбранных целей, а номера его элементов — номерам выбравших эти цели подвижных объектов. Оставшиеся подвижные объекты в следующем итерационном цикле распределяют между собой неиспользованные цели. В результате выполнения второго цикла массивы L, N принимают вид

$$L = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 5 & 2 & 8 & 0 & 7 & 1 & 5 & 0 & 6 & 0 & 9 & 6 & 10 & 0 & 5 & 10 & 4 & 8 & 9 & 9 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 & 1 & 3 & 2 & 1 & 2 & 3 & 2 \end{bmatrix}$$

По окончании этого цикла получена нулевая матрица D размерностью (24 × 10).

Сравнивая массивы N и N_{max}, видим, что они равны. Это означает, что все цели выбраны необходимым количеством подвижных объектов, и поставленная задача решена. Результирующий массив L отражает оптимальное решение задачи распределения целей между подвижными объектами данной группы. Шестой, десятый, двенадцатый и шестнадцатый подвижные объекты не выбрали цели, так как объектов оказалось больше, чем необходимо для обеспечения целей. Кроме того, эффективность выбора этими объектами целей ниже в сравнении с выбором, произ-

веденным другими объектами группы. Можно показать, что суммарный эффект от решения задачи целераспределения, определяемый значением функционала (9), равным $Y = 180{,}0$, является локальным максимумом.

В приведенном примере число циклов итерационной процедуры оптимизации коллективного решения при реализации группового алгоритма распределения целей меньше числа объектов. На первой итерации цели выбраны тринадцатью подвижными объектами, на второй — семью подвижными объектами.

Как видно из алгоритма, выбор цели (принятие решения) каждый раз осуществляется подвижным объектом, который имеет наибольшую или одинаковую оценку эффективности своего действия по отношению к данной цели по сравнению с подвижными объектами группы, еще не принявшими решения о своем действии. Поэтому по окончании работы алгоритма функционал (9) имеет максимальное значение, т. е. принятое решение о распределении заданного массива {X} целей между подвижными объектами группы является оптимальным.

Таким образом, на основе представленного вычислительного алгоритма и программы в кодах MatLab, возможно оперативно осуществлять выбор такого распределения целей, при котором достигается наибольшая эффективность групповых действий подвижных объектов.

Список литературы

1. *Сахаров В. В.* Алгоритм оптимального планирования группового взаимодействия роботов / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Д. С. Тормашев // Морской вестник. — 2014. — № 4. — С. 119–122.

2. *Шаповалов И. О.* Применение групп мобильных роботов в сложных транспортных задачах / И. О. Шаповалов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. — 2012. — № 2. — С. 141–146.

3. *Каляев И. А.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустин. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 280 с.

4. *Rochefort Y.* Guidance of flocks of vehicles using virtual signposts / Y. Rochefort [et al] // Proceeding of the 18th IFAC World Congress. — Milan, Italy. — 2011. — Pp. 5999–6004.

5. *Гайдук А. Р.* Оптимальное перемещение тела интеллектуальным роботом / А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян, И. О. Шаповалов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2009. — № 7. — С. 43– 46.

6. *Каляев И. А.* Распределенные системы планирования действий коллективов роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустин. — М.: Янус-К, 2002. — 292 с.

7. *Юревич Е. И.* Управление роботами и робототехническими системами / Е. И. Юревич. — СПб.: Изд. СПбГПУ, 2001.

8. *Шаповалов И. О.* Распределенная система управления группой автономных мобильных роботов / И. О. Шаповалов // Информационное противодействие угрозам терроризма. — 2012. — № 19. — С. 105–108.

9. *Каляев И. А.* Использование принципов коллективного принятия решений при управлении группой автоматических лифтов / И. А. Каляев // Мехатроника. — 2001. — № 4. — С. 30–35.

10. *Thomas R. Kurfess (Ed.).* Robotics and Automation Handbook. CRC Press LLC, 2005. — 579 p.

11. *Каляев И. А.* Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян // Вестник Южного научного центра РАН. — 2005. — Т. 1. — № 2. — С. 20–27.

12. *Каляев И. А.* Интеллектуальные роботы / Под общей ред. Е. И. Юревича / И. А. Каляев, В. М. Лохин, И. М. Макаров [и др.]. — М.: Машиностроение, 2007. — 360 с.

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

УДК 378.1

С. Н. Тарануха,
канд. техн. наук, доц.

ДИСТАНЦИОННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМЕ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ ЧЛЕНОВ ЭКИПАЖЕЙ СУДОВ

DISTANCE EDUCATION TECHNOLOGIES IN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF TRAINING SEAFARERS

Внедрение электронного обучения и дистанционных образовательных технологий, а также реализация принципов менеджмента качества в образовательном процессе сегодня не только востребованы обществом, но и закреплены в национальном и международном законодательстве и активно используются в подготовке специалистов различной направленности. В статье рассмотрено место дистанционных образовательных технологий в системе качества подготовки моряков; описаны требования к системе дистанционного обучения плавсостава, установленные Конвенцией о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 г. (ПДМНВ-78) с поправками, и процедурам системы качества; обоснована необходимость интеграции образовательных организаций с разработчиками профессионально ориентированных образовательных информационных ресурсов; приведены примеры использования дистанционных образовательных технологий при подготовке плавсостава. Сформулированы основные системные принципы управления качеством подготовки членов экипажей морских судов различных уровней образования для создания единого информационно-образовательного пространства с использованием интернет-технологий.

The introduction of e-learning and distance learning technologies, and the implementation of quality management principles in the educational process today is not only demanded by the society and is enshrined in national and international legislation and are actively used in the training of specialists of various kinds. The article considers the place of distance learning technologies in the quality system of training seafarers, describes the requirements for a distance learning system for training of seafarers established by the STCW Convention, and the procedures of the quality system; necessity of integration of educational institutions with developers professionally oriented educational information resources; examples of the use of the distance learning system in the preparation of training seafarers. Formulated fundamental principles of quality management of preparation of crews of vessels of various levels of education to create a unified information and educational space with the use of Internet technologies.

Ключевые слова: система менеджмента качества, дистанционные образовательные технологии, информационные технологии, интернет-технологии, образование, профессиональное обучение.

Key words: quality management system, distance learning technologies, information technology, Internet-technology, seafarers professional education.

ПОДДЕРЖАНИЕ качества подготовки моряков в российских вузах в соответствии с требованиями мировых стандартов, принятыми в международных конвенциях, а также национального законодательства в области образования стало одним из важных факторов подтверждения статуса России как одной из ведущих мировых морских держав и защищенности наших выпускников на международном рынке труда. В настоящее время существуют различные пути повышения качества образования — как процесса и как результата. Качество образовательного процесса (уровень его организации, адекватность образовательных технологий и средств обучения, квалификация преподавателей и т. д.), реализуемого в университете, гарантирует создание условий, которые с учетом способностей и личностных характеристик обучающихся позволят получить высокое (заданное международными требованиями и национальными образовательными стандартами и программами подготовки) качество результата образования в целом [1].

Как показывает опыт передовых российских вузов, вузов Росморречфлота, внедрение принципов менеджмента качества является одним из эффективных средств улучшения организации

подготовки выпускников. Поэтому в Государственном университете морского и речного флота (ГУМРФ) имени адмирала С. О. Макарова внедрена и сертифицирована Российским морским регистром судоходства система менеджмента качества (СМК). Действие СМК распространяется на деятельность всего университета в целом, однако система стандартов качества для образовательных программ, осуществляющих подготовку и повышение квалификации моряков, учитывает специфические требования, установленные Конвенцией ПДМНВ-78 (далее — Конвенция ПДНВ).

Таким образом, система управления качеством, сформировавшаяся в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, включает две составляющие:

– мониторинг качества обучения (с точки зрения результата обучения);

– систему менеджмента качества (с точки зрения организации и управления процессом обучения).

Требования к процессу подготовки моряков включают активное внедрение и использование различного рода инноваций в администрировании учебного процесса, в образовательных технологиях, в используемом тренажерном оборудовании, в подборе и подготовке преподавательских кадров и т. д.

Одним из видов инноваций в организации подготовки плавсостава является реализация дистанционных образовательных технологий (ДОТ). Сегодня ДОТ рассматриваются как ведущий инструмент для расширения системы профессионального образования, они являются одним из способов снижения затрат и повышения возможности получения образования широкими слоями населения. Поэтому для обеспечения потребностей государства, работодателей и граждан в получении качественного образования по востребованным программам подготовки и национальное законодательство в области образования, и Конвенция ПДНВ нацеливают образовательные организации на использование в организации и реализации образовательного процесса дистанционных технологий и электронного обучения [2].

Реализация ДОТ возможна при использовании автоматизированной информационной системы (АИС), которая должна осуществлять регистрацию, входной контроль и тестирование, интерактивный режим обучения, текущий контроль компетенций, полученных обучающимися, и т. д. При реализации электронного интерактивного обучения плавсостава особое внимание должно быть обращено на имитационное обучение (отработку действий по управлению судном, экипажем, различными службами портов во внештатных ситуациях, действиями экипажа в сложных аварийных случаях и т. д.). Роль АИС ДОТ заключается не только в предоставлении обучающимся квалифицированных теоретический знаний, формирующих общекультурные компетенции, но и квазипрофессиональных ситуационных заданий для формирования профессиональных компетенций и дальнейшего успешного прохождения итоговой аттестации. При этом итоговая государственная аттестация выпускников программ высшего или среднего профессионального образования должна осуществляться непосредственно в вузе или его филиале (опорном пункте) с обязательным привлечением представителей работодателей. Учитывая современный уровень развития web-технологий, национальное законодательство разрешает проведение итоговых аттестационных испытаний выпускников по программам дополнительного профессионального образования с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий [3].

Для обеспечения единых подходов к качеству результата обучения выпускников, технологичности и стандартизации процесса дистанционного обучения (ДО) его реализация должна осуществляться в рамках общеуниверситетской системы стандартов качества и требований Конвенции ПДНВ (раздел В- I/6), предъявляемых к использованию дистанционного и электронного обучения [4]. Система ДО моряков должна:

– являться подходящей для выбранных целей и задач подготовки персонала, отвечать уровню компетентности и рассматриваемому диплому;

– иметь недвусмысленные инструкции для обучающихся по функционированию обучающей программы;

– обеспечивать результаты обучения, отвечающие всем требованиям по предоставлению основных знаний и профессионализма в изучаемой области;

– позволять осуществлять самооценку обучающимся, а также оценку преподавателями знаний, усвоенных обучающимися;

– обеспечивать возможность взаимодействия тьютора и обучающегося.

Кроме обеспечения требований к надежности среды обучения и защиты персональных данных обучающихся, форматам предоставления информации и обмена данными, в документированной процедуре университета по оценке результатов обучения с использованием дистанционного и электронного обучения устанавливаются:

– порядок проведения аттестаций и сообщения аттестуемым итоговых результатов;

– обеспечение требований к однозначности формулировок заданий и соответствие проверяемого уровня проверяемой компетентности;

– условия проведения и контроля аттестации;

– требования к надежности экзаменационной системы для обеспечения достоверности, регистрации и хранения результата обучения.

Требования процедур системы менеджмента качества университета, гармонизированные с требованиями Конвенции ПДНВ в части:

– приема и зачисления обучающихся;

– разработки новых и пересмотра имеющихся учебных курсов (основных и дополнительных образовательных программ, рабочих программ учебных дисциплин);

– системы проведения аттестации, включая апелляции и повторную аттестацию;

– приема на работу преподавателей, подготовки, повышения квалификации, повышения в должности и оценке;

– обратной связи с потребителями (обучающимися и предприятиями отрасли),

распространяются и на администрирование и реализацию образовательного процесса с использованием дистанционных технологий и электронного обучения с учетом имеющейся специфики данных технологий. Специфика определяется дополнительными требованиями к умениям обучающихся, администраторов и преподавателей, техническим средствам обучения, передаче, обработке и хранению информации.

Учитывая многофакторность задач, возникающих у образовательных организаций, для эффективной подготовки плавсостава с использованием ДОТ и электронного обучения, включающих:

– разработку процедур по организации обучения с использованием ДОТ и электронного обучения;

– разработку структуры и профессионально-ориентированного контента реализуемых образовательных программ;

– получение одобрения на разработанные образовательные программы со стороны уполномоченного органа;

– создание инфраструктуры для разработки электронных курсов и реализации учебного процесса;

– подготовку административных и преподавательских кадров для работы с данными технологиями;

– приобретение современного лицензионного системного и прикладного программного обеспечения;

– приобретение мощного или модернизации имеющегося серверного оборудования для хранения данных и рабочих станций пользователей;

– обеспечение работы высокоскоростных каналов связи и т. д.,

можно утверждать, что реализация данного проекта становится достаточно затратной для университета в части потенциальной разнородности задействованных ресурсов (административных, финансовых, персонала, интеллектуальных разработок, техники и технологий).

Одним из способов решения данной задачи является интеграция образовательной организации и компаний, специализирующихся на разработке программного обеспечения в области морской профессиональной деятельности в части разработки электронных средств обучения и предоставления облачных сервисов. Примером такого сотрудничества в части повышения квалификации плавсостава может стать потенциальное взаимодействие университета с ООО «СТОРМ» [5] и Группой «Транзас» — эти компании являются разработчиками системы дистанционной подготовки и проверки знаний специалистов водного транспорта. В частности, ООО «СТОРМ» разработана технология «СТОРМ-М», с помощью которой осуществляется подготовка специалистов водного транспорта. Использование технологии «СТОРМ-М» для повышения квалификации специалистов позволяет:

– снизить себестоимость обучения;

– организовать подготовку, практически без отрыва от производства;

– начать подготовку в любое удобное время, не дожидаясь формирования группы;

– контролировать уровень полученных знаний во время изучения курса;

– приобрести устойчивые практические умения и навыки за счет занятий на тренажерах, в том числе, навыки поведения в чрезвычайных ситуациях;

– подготовиться к аттестации.

Тестирование обучающихся производится на интернет-сайте СДТ «Web-Дельта» при помощи специализированного web-приложения, в котором реализован механизм проверки знаний программного комплекса (ПК) «Дельта-Тест». Программный комплекс «Дельта-Тест» предназначен для автоматизированной проверки знаний членов экипажей судов и слушателей образовательных организаций водного транспорта в соответствии с международными и национальными требованиями.

ПК «Дельта-Тест» является результатом совместной разработки ООО «СТОРМ» и ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, одобрен Федеральным агентством морского и речного транспорта для внедрения в морские квалификационные комиссии Администраций морских портов Российской Федерации и учебный процесс образовательных учреждений, осуществляющих подготовку моряков (Письмо №ВР-27-692 от 11 февраля 2005 г.). В базу данных ПК «Дельта-Тест» включено более 12 000 тестовых заданий. В настоящий момент ПК «Дельта-Тест» установлен в более чем 100 организациях водного транспорта: морских квалификационных комиссиях, учебных заведениях, образовательных центрах, крюинговых и судоходных компаниях.

Использование ПК «Дельта-Тест» позволяет:

– уменьшить влияние субъективного фактора при проведении проверок знаний;

– архивировать результаты тестирования;

– получать своевременное обновление баз данных оценочных средств;

– проводить входные, промежуточные и итоговые проверки знаний.

Таким образом, одной из форм интеграции университета и фирм-разработчиков в области информационных технологий может стать совместное использование образовательного контента, технических и технологических ресурсов, удаленных серверов фирм-разработчиков для хранения и обработки результатов обучения слушателей. Однако реализация такого сотрудничества должна быть гарантирована наличием соответствующих сертификатов, подтверждающих одобрение со стороны Минтранса России и соответствие используемых тренажеров и обучающих программ требованиям Конвенции ПДНВ, не противоречить российскому законодательству в области образовательной деятельности, а также соответствовать требованиям системы стандартов качества университета.

Более масштабным проектом использования ДОТ является обучение курсантов по основным образовательным программам высшего и среднего профессионального образования плавсостава с помощью разработанной в университете автоматизированной информационной системы дистанционного обучения (СДО) «Фарватер», являющейся одной из основных составляющих электронной информационно-образовательной среды университета [6]. Основным

назначением СДО «Фарватер» является предоставление выделенной электронной площадки для учебной внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся. Как элемент электронной информационно-образовательной среды университета, СДО «Фарватер» обеспечивает возможности для создания и размещения электронного учебно-методического комплекса: разработку лекций и фонда оценочных средств, дистанционный контроль знаний обучающихся; организацию тестирования и анкетирования потребителей, размещение учебно-методического обеспечения.

Процессы организации регистрации и идентификации личности обучающихся, входного контроля, взаимодействия преподаватель — обучающийся, проведения итоговых аттестационных испытаний с применением электронного обучения, дистанционных образовательных технологий, инструкции пользователей (преподавателей, обучающихся, администраторов) и т.д. регламентированы соответствующими положениями и процедурами, являющимися составляющими документации системы качества университета.

Одним из инструментов независимого мониторинга качества результата обучения курсантов является участие университета в программе «Федеральный интернет-экзамен: компетентностный подход», позволяющей реализовать диагностическую технологию внешнего оценивания компетенций на всем пути освоения содержания программ обучения. Поэтапный анализ достижений обучающихся фокусирует внимание на результате каждого отдельного курсанта, что особенно важно при реализации компетентностного подхода, основанного на формировании и развитии компетенций. Решение курсантами нестандартных практико-ориентированных заданий говорит о степени влияния процесса изучения дисциплины на формирование у них профессиональных и общекультурных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС [7].

Следующим направлением использования облачных ресурсов является использование системы «Интернет-тренажеры в сфере образования» (НИИ мониторинга качества образования), представляющей собой программный комплекс, в основу которого положены оригинальная методика оценки знаний, умений, навыков курсантов и целенаправленная тренировка обучающихся в процессе многократного повторного решения тестовых заданий. Тренажеры позволяют курсантам самостоятельно подготовиться к внешним и внутренним процедурам контроля качества знаний. Эту технологию можно использовать в любой точке доступа к сети Интернет, что особенно важно при применении дистанционных технологий обучения.

Облачные технологии предлагают учебным заведениям дополнительные возможности для предоставления динамичных и актуальных, основанных на интернет-технологиях приложений для дистанционного и электронного обучения, обеспечивают высокий уровень обслуживания потребителей и соответствие информационного курса политике учебного заведения, государственным образовательным стандартам и международным требованиям [8], [9]. При этом надо отдавать отчет в возможности возникновения у вузов ряда рисков, вызванных взаимодействием с третьими лицами при реализации образовательного процесса с использованием облачных сервисов:

– университет не имеет доступа к внутренней облачной инфраструктуре. Сохранность пользовательских данных (данных обучающихся) во многом зависит от компании-провайдера;

– недостаток, актуальный для российских пользователей: для получения качественных услуг пользователю необходимо иметь надежный и быстрый доступ в сеть Интернет;

– не все данные можно доверить провайдеру для хранения и обработки;

– не каждое приложение позволяет сохранить промежуточные этапы обработки информации, а также конечный результат работы обучающихся;

– доверяя свои данные web-сервису, университет теряет над ними контроль, тем самым ограничивая свою свободу;

– в долгосрочной перспективе облачная модель может оказаться дороже, чем размещение локального (традиционного) сервера, в частности это касается облачной технологии SaaS.

Таким образом, развитие интернет-технологий, реализуемых при подготовке членов экипажей судов, привело к использованию достаточно разнородного комплекса программных сервисов, к которым осуществляется доступ в интернет или интранет-среде независимо от местоположения пользователей [10], [11]. Сегодня сервисная организация информационно-вычислительного обслуживания базируется на некоем количестве независимых и несвязанных сервисов, на основе которых формируется эклектичная структура динамических информационных процессов. Поэтому перед образовательной организацией встает проблема отбора, систематизации и адаптации web-сервисов к изменениям условий и требованиям образовательного законодательства, рынка образовательных услуг, соответствия используемых информационных технологий заданному конкретному виду профессиональной деятельности.

Интеграция разнородных поставщиков знаний, межуровневый образовательный характер их использования, необходимость привлечения внешних источников знаний, обмен знаниями между пользователями при реализации образовательного процесса предполагают применение системного подхода к организации структуры единого информационно-образовательного пространства. В качестве основных системных принципов управления качеством подготовки членов экипажей судов различных уровней образования и ответственности и создания единого информационно-образовательного пространства с использованием интернет-технологий следует выделить следующие вопросы, нашедшие отражение на уровне реализуемых документированных процедур и соответствующих бизнес-процессов:

– формирование единых требований к организациям-поставщикам web-сервисов для подготовки плавсостава;

– объединение различных источников информационных ресурсов в рамках единого профессионально ориентированного информационно-образовательного пространства;

– обеспечение постоянного развития автоматизированной информационной системы дистанционного обучения за счет обновления теоретического знания, накопления нового практического опыта и обновления программного, материально-технического и технологического ресурсов.

Взаимная заинтересованность в подготовке и повышении квалификации специалистов плавсостава со стороны высших учебных заведений, организаций-разработчиков web-сервисов для подготовки плавсостава, обучаемых и работодателей, национальное и международное законодательство в области образования, уровень развития интернет-технологий и квалификация преподавательского состава делают реализацию ДО для подготовки членов экипажей судов сегодня реально реализуемым, востребованным и эффективным проектом.

Выводы. В статье рассмотрено место дистанционных образовательных технологий в системе качества подготовки моряков; описаны требования к системе дистанционного обучения для обучения плавсостава, установленные Конвенцией ПДНВ, и процедурам системы качества. Кроме того, проанализирована возможность взаимодействия университета с организациями-разработчиками, специализирующимися на разработке программного обеспечения в области морской профессиональной деятельности, в части разработки электронных средств обучения и предоставления облачных сервисов, обоснована необходимость интеграции образовательных организаций с разработчиками профессионально ориентированных образовательных информационных ресурсов. Приведены примеры использования ДОТ при подготовке плавсостава, а также примеры образовательных интернет-проектов, реализуемых на национальном уровне, для проверки качества подготовки курсантов. Подтверждена необходимость использования образовательными учреждениями облачных технологий для обеспечения дополнительных возможностей обучающимся при предоставлении динамичных приложений, основанных на интернет-технологиях, для дистанционного и электронного обучения. Сформулированы основные системные принципы управления качеством подготовки членов экипажей судов различных уровней образования для создания единого информационно-образовательного пространства с использованием интернет-технологий.

Список литературы

1. *Тарануха С. Н.* Информационно-образовательная среда как фактор качественного изменения профессионального образования/ А. А. Кузьмин, С. Н. Тарануха // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 2 (10). — С. 113–119.

2. Федеральный закон от 29.12.2012 N 273-ФЗ (ред. от 31.12.2014, с изм. от 06.04.2015) «Об образовании в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://base.garant.ru/70291362/ (дата обращения: 13.05.2015).

3. Письмо Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 марта 2015 г. № АК-821/06 «О направлении методических рекомендаций по итоговой аттестации слушателей». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://273-фз.рф/akty_minobrnauki_rossii/pismo-minobrnauki-rf-ot-30032015-no-ak-82106 (дата обращения: 16.05.2015).

4. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несения вахты 1978 года (ПДМНВ-78) с поправками (консолидированный текст) / International Convention on Standards of training, Certification and Watchkeepingfor Seafarers, 1978 (STCW 1978), as amended (consolidated text). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010.

5. Система дистанционной подготовки специалистов водного транспорта. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.100rmsim.ru/product/131.html (дата обращения: 10.05.2015).

6. *Пастущак Т. Н.* Приоритетные направления развития электронной информационно-образовательной среды отраслевого университетского комплекса / Т. Н. Пастущак, С. С. Соколов, Н. М. Ковальногова [и др.] // Информационные технологии. — 2014. — № 9. — С. 40–46.

7. ФЭПО. Соответствие требованиям ФГОС [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://fepo.i-exam.ru/node/68 (дата обращения: 09.04.2015).

8. Облачные технологии в образовании [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://wiki.vspu.ru/workroom/tehnol/index (дата обращения: 28.04.2015).

9. Склейтер Нил. Облачные вычисления в образовании: аналитическая записка: пер. с англ. / Нил Склейтер. — М.: Институт ЮНЕСКО по информационным технологиям в образовании, 2010.

10. *Тельнов Ю. Ф.* Принципы и методы семантического структурирования информационно-образовательного пространства на основе онтологического подхода / Ю. Ф. Тельнов // Вестник УМО. Экономика, Статистика и Информатика. — 2014. — № 1. — С. 187–191.

11. *Тельнов Ю. Ф.* Динамическая интеллектуальная система управления процессами в информационно-образовательном пространстве высших учебных заведений / Ю. Ф. Тельнов, В. А. Казаков, О. А. Козлова // Научно-практический журнал «Открытое образование». — 2013. — № 1. — С. 61–65.

ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МОРСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ: ТЕНДЕНЦИИ И ВЫЗОВЫ XXI ВЕКА»

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЕРЕНЦИИ

В рамках Года морского образования, объявленного Международной морской организацией (ИМО), в г. Санкт-Петербурге 7 июля 2015 г. в Государственном университете морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова состоялась Международная научно-практическая конференция «Морское образование: тенденции и вызовы XXI века». Конференция проводилась при поддержке Министерства транспорта Российской Федерации, Федерального агентства морского и речного транспорта и участии Международной морской организации (ИМО).



Для участия в конференции зарегистрировались 115 человек. Среди них представители морских учебных заведений, учебно-тренажерных центров, судоходных компаний, морских администраций не только России, но и Азербайджана, Казахстана, Латвии, Финляндии, Эстонии, Нидерландов.

С торжественной речью по поводу открытия конференции выступил ректор Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова Сергей Олегович Барышников. Он зачитал поступившее в адрес участников конференции приветствие от Министра транспорта Российской Федерации Максима Юрьевича Соколова.

С приветственным словом к участникам конференции обратилась Татьяна Ивановна Чекалова — ответственный секретарь Морского совета при Правительстве Санкт-Петербурга.

Программа конференции включала пленарное заседание, «круглый стол» на тему «Взаимодействие образовательных организаций, морских администраций, судоходных компаний в подготовке плавсостава», сессию «Новые ступени на пути к совершенству в подготовке моряков».

На пленарном заседании были рассмотрены основные тенденции и перспективы развития морского образования. С докладом о подготовке плавсостава выступил Генеральный секретарь ИМО Кодзи Секимицу. Доклад «О взаимодействии университета с международными организациями в области морского образования» представил ректор ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова С. О. Барышников. О роли международного сотрудничества в деятельности морских учебных заведений рассказал Такеши Наказава, исполнительный директор Международной ассоциации морских университетов — IAMU (Япония). Алексей Юрьевич Клявин, Президент Российской палаты судоходства, в своем докладе рассмотрел вопросы подготовки и дипломирования плавсостава, проблемы и решения обеспечения флота квалифицированными кадрами в современных условиях работы судоходных компаний. На вопросах перспектив морского образования с точки зрения судовладельцев акцентировали внимание в своих до-

кладах Игорь Васильевич Тонковидов, первый заместитель генерального директора – главный инженер ПАО «Совкомфлот» и Александр Надежников, директор LAPA Ltd.Co. (Латвия). С докладом «Глобальные проблемы подготовки моряков в XXI в. Оптимальные пути восполнения пробелов» выступил Хисаши Ямамото, Генеральный секретарь Глобального центра обучения на борту — GOBTC (Япония).

В завершение пленарного заседания был подписан меморандум о сотрудничестве между ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» (Россия) и ЗАО «Азербайджанское каспийское морское пароходство» (Азербайджанская Республика).

Модератором «круглого стола» на тему «Взаимодействие образовательных организаций, морских администраций, судоходных компаний в подготовке плавсостава» выступил Владимир Александрович Логиновский, заведующий кафедрой навигации ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова.

Спикеры «круглого стола»: Кодзи Секимицу, генеральный секретарь ИМО; Ашок Махапатра, помощник генерального секретаря ИМО; Такеши Наказава, исполнительный директор Международной ассоциации морских университетов IAMU; Клявин Алексей Юрьевич, президент союза «Российская палата судоходства»; Хисаши Ямамото, генеральный секретарь GOBTC; Тонковидов Игорь Васильевич, первый заместитель генерального директора – главный инженер ПАО «Совкомфлот», — обсудили вопросы организации плавательной практики курсантов и ответили на вопросы из зала.

В рамках конференции состоялся брифинг для журналистов с руководителями ведущих отраслевых вузов России в сфере морского и речного транспорта. В нем приняли участие ректор Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова Сергей Барышников (г. Санкт-Петербург), ректор Морского государственного университета им. Г. И. Невельского Сергей Огай (г. Владивосток), ректор Волжского государственного университета водного транспорта Игорь Кузьмичев (г. Нижний Новгород), ректор Керченского государственного морского технологического университета Евгений Масюткин (Крым, г. Керчь) и проректор по научной работе Московской государственной академии водного транспорта Олег Соляков (г. Москва). Модератором брифинга выступила директор по развитию ИАА «ПортНьюс» Надежда Малышева.

Основной темой брифинга явился вопрос о повышении престижа морской профессии и привлечении молодого поколения в морские вузы. На сессии «Новые ступени на пути к совершенству в подготовке моряков был заслушан ряд докладов.

В. В. Соклаков, заместитель начальника отдела сертификации систем менеджмента, продукции и услуг ФАУ «Российский морской регистр судоходства» рассказал о результатах независимой оценки внедрения требований МК ПДНВ в РФ.

С. А. Огай, ректор ФБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского» поделился опытом взаимодействия с судоходными компаниями по организации практической подготовки курсантов на учебных и производственных судах.

С. В. Дадыка, начальник Управления эксплуатации портов и флота ФГУП «Росморпорт» продолжил тему организации и проведения плавательной практики на примере учебного флота ФГУП «Росморпорт».

О применении современных тренажерных технологий при оценке и анализе уровня компетенции моряков рассказал Крис ван Аар, менеджер проектов STC-GROUP B. V. Морской университет (Нидерланды).

И. К. Кузьмичев, ректор ФГБОУ ВО «ВГУВТ» в своем докладе рассмотрел вопросы применения сетевых форм обучения в морском образовании.

Заместитель директора морского колледжа Novikontas Дмитрийс Семеновс остановился на вопросах будущего морского образования и практики подготовки.

Халявинс Алексейс, генеральный директор V.Ships Limited (Кипр) представил доклад «Основные потребности судоходных компаний относительно судового персонала. Риски для индустрии и пути решения».

С заключительным докладом на тему «О подготовке преподавателей профессиональных дисциплин в соответствии с требованиями Конвенции ПДНВ» выступил А. П. Горобцов директор института «Морская академия» ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова».

В рамках проведения Международной конференции состоялось открытие нового тренажерного комплекса по подготовке персонала танкеров по выживанию на море Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. В торжественной церемонии открытия приняли участие: Коджи Секимидзу, генеральный секретарь Международной Морской организации (IMO), Сергей Барышников, ректор ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, Дмитрий Кинэ, генеральный директор ООО «Газпромнефть шиппинг».

Завершилось мероприятие экскурсией по Учебно-тренажерному центру по выживанию на море Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.

МИНИСТР ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УЧАСТНИКАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МОРСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ: ТЕНДЕНЦИИ И ВЫЗОВЫ XXI ВЕКА»

Уважаемые участники конференции!

От имени Министерства транспорта Российской Федерации приветствую организаторов, участников и гостей Международной научно-практической конференции «Морское образование: тенденции и вызовы XXI века»!

Сегодня морской транспорт России получил мощный импульс для своего развития. Более шестидесяти процентов всей внешней торговли осуществляется посредством морской торговли, работают 68 морских портов, повышаются качественные характеристики судов и оборудования, осуществляется спуск на воду новых отечественных грузовых и пассажирских судов.

Обеспечение безопасности судоходства, повышение качества транспортных услуг требует опережающей подготовки высокопрофессиональных кадров, поэтому так актуальны вопросы, заявленные в тематике конференции.

Учебные заведения транспортного комплекса с честью справляются с поставленными перед ними задачами в подготовке кадров, адаптированных к международным требованиям, владеющих современными технологиями, сочетающих хорошую фундаментальную подготовку и практические навыки. Обмен опытом и передовыми технологиями, совместные долгосрочные проекты в сфере морского образования и науки позволят решить задачи в области инновационного развития морского транспорта.

Уверен, что конференция пройдет в конструктивной и творческой атмосфере, обеспечит максимальные возможности для тесного взаимодействия специалистов, обмена опытом, наращивания деловых контактов, будет способствовать становлению стратегического партнерства и укреплению международных связей, продвижению и популяризации морских профессий, поможет привлечь будущих выпускников в судоходную индустрию.

Желаю всем плодотворной и содержательной работы, интересных встреч и осуществления намеченных планов!

№ 40
июль 2015

М.Ю. Соколов

С. О. Барышников,
д-р техн. наук, проф.,
ректор ФГБОУ ВО
«ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УНИВЕРСИТЕТА С МЕЖДУНАРОДНЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ В ОБЛАСТИ МОРСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ (ПО МАТЕРИАЛАМ ДОКЛАДА)

INTERACTION OF UNIVERSITY WITH THE INTERNATIONAL ORGANIZATIONS IN THE FIELD OF MARINE EDUCATION (BASED ON THE REPORT MATERIALS)

Морской флот всегда был важной составляющей транспортного комплекса, неотъемлемой частью всей экономики страны, и сейчас он играет важную роль в реализации транспортной стратегии России.

Я сегодня рад приветствовать гостей конференции в Государственном университете морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова — вузе, объединившем историю и традиции Государственной морской академии имени адмирала С. О. Макарова и Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций. Объединение и изменение названия вуза не повлияло на отношения и связи университета с международными организациями в области морского образования, а даже, в какой-то степени, способствовало укреплению его положения и повышению международного признания.

Качество подготовки подтверждено морскими Администрациями России, Норвегии, Либерии, Маршалловых островов, ведущими классификационными обществами, международной сертификационной сетью IQNet, британским The Nautical Institute и другими авторитетными отечественными и международными организациями.

Университет активно сотрудничает с ведущими международными морскими организациями, такими как Международная морская организация (IMO), Всемирная ассоциация морских университетов (IAMU), Ассоциация морских учебных заведений под патронажем компании Stena (STAMI), является одним из участников меморандума по созданию Международной ассоциации учебных парусных судов, который был подписан на Дипломатической Конференции в Маниле в 2010 году и др.

ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова имеет двусторонние соглашения о сотрудничестве с 15 иностранными морскими учебными заведениями. Отдельно следует отметить сотрудничество со Всемирным морским университетом (Мальме, Швеция).

Наши студенты и курсанты участвуют в программах обмена. Профессорско-преподавательский состав приглашается на стажировки, для чтения лекций и проведения практических занятий. Разрабатываются программы двойных дипломов. Так, за последние два учебных года 11 наших студентов прошли обучение в Морской академии штата Мэн (США), Университете прикладных наук Кюменлааксо (Финляндия), Университетском колледже Сторд Наугезунд (Норвегия) и Колледже Глазго (Великобритания).

Университет на протяжении многих лет сотрудничает с различными зарубежными учебными и исследовательскими институтами как в организации и проведении учебных курсов, так и в проведении совместных исследовательских проектов.

Примером такого сотрудничества могут служить курсы подготовки к ледовому плаванию. Эти курсы проводятся не только на тренажерных комплексах Морского учебно-тренажерного центра университета, но и на ледокольном судне Kotka Vocational College и KOTkA University of Applied science (Котка, Финляндия), а так же в лабораториях ледового бассейна Aker Arctic (Хель-

синки, Финляндия). Большой опыт Морского учебно-тренажерного центра университета, а мы обучили более 900 моряков плаванию во льдах, из них более 50 % — граждане других стран или российские моряки, работающие под флагами многих стран мира, а так же опыт и знания наших финских коллег позволяют сделать ледовые курсы особенно полезными и эффективными.

Еще одним показательным примером сотрудничества является совместная работа университета и Kotka Vocational College по подготовке операторов центров управления движения судов. Реализация этих курсов стала возможна благодаря успешному завершению международного проекта RESCOP в результате которого было обеспечено сопряжения тренажеров СУДС в Санкт-Петербурге и Котке. Это позволяет начать совместную подготовку операторов СУДС России и Финляндии.

Университетом заключены соглашения с 15 иностранными компаниями-судовладельцами о прохождении плавательной практики курсантами на их судах. Таким образом, ежегодно мы обеспечиваем практикой более 80 курсантов старших курсов. И я хотел бы отметить, что в дальнейшем наши иностранные партнеры охотно трудоустраивают выпускников университета. Стабильно растущий спрос на международном рынке труда на молодых судоводителей, судомехаников и электромехаников – специалистов, подготовленных в стенах ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, подтверждает высокий уровень их теоретических знаний и практических навыков, соответствующих современным требованиям.

Университет тесно сотрудничает с иностранными и российскими компаниями среди которых классификационные общества: Регистр Ллойда, Американ бюро оф шиппинг и др. С помощью наших партнеров, судовладельцев и промышленных компаний, университет в течение нескольких последних лет значительно обновил учебно-материальную базу. При их поддержке были построены и в настоящее время активно используются в учебной процессе тренажерный класс по безопасной эксплуатации танкеров (спонсор — Газпром маркетинг и трейдинг), учебный класс Стена Дриллинг, сварочный участок лаборатории практической подготовки (спонсор — Дайнагаз), Учебный класс по теории устройства судна (спонсор — АкзоНобел).

Мы с гордостью можем заявить, что лаборатория судовых высоковольтных электроэнергетических систем (спонсор — ABB) и построенная в этом учебном году лаборатория электрических машин (спонсоры — Дайнагаз и Газпром маркетинг и трейдинг) являются уникальными и не имеют аналогов на территории РФ. Ведется строительство еще одной уникальной лаборатории на факультете судовой энергетики – лаборатории главного двигателя, которая позволит нам решать широкий спектр задач по обучению курсантов-судомехаников.

Международная деятельность, реализуемая университетом, является одним из важнейших направлений, способствует решению основных задач, поставленных перед вузом — подготовке высококвалифицированных специалистов, реализации научно-образовательных проектов. Полагаю, что развитие сотрудничества с международными морскими организациями является не только одним из эффективных способов повышения конкурентных преимуществ университета на международном рынке образовательных услуг, но и позволяет поднять качество профессионального морского образования.

Captain Aleksandrs Nadeznikovs,
General Manager and Board Member of "LAPA Ltd.",
International Crewing Agents and Training Center, Riga, Latvia;

Captain Nikolajs Romanovs,
Instructor, "LAPA Ltd."

DEVELOPMENT PROSPECTS OF MET: SHIPOWNERS' POINT OF VIEW

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОРСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ И ОБУЧЕНИЯ: МНЕНИЕ СУДОВЛАДЕЛЬЦЕВ

Эта статья выражает мнение судовладельцев о перспективах развития морского образования и обучения в свете сегодняшнего динамичного развития и глобализации морской отрасли в целом на фоне глобального недостатка обученного персонала, террористических, военных и пиратских угроз, экономических вызовов. Это развитие, включающее внедрение новых компьютерных технологий, новых технологий перевозки грузов, требований международного и национальных законодательств, отраслевых требований, требований владельцев грузов, требовний по защите окружающей среды, требует также новых подходов, техник и умений преподавания в морском образовании и обучении для обеспечения отрасли хорошо обученным, мотивированным персоналом для эксплуатации современных судов.

This article is reflecting ship owners' opinion about development prospects of maritime education and training in scope of today dynamic development and globalization of maritime industry in general with global lack of properly trained personnel, terroristic, military and piracy threats, economical challenges on the background. This development which includes implementation of new computer based technologies, new cargo transportation technologies, international and national legislation requirements, industry requirements, cargo owners' requirements, environmental protection requirements, require also new approaches, teaching technics and skills in maritime education and training to provide industry with well trained, motivated personnel to operate modern ships.

Introduction

Author of this article Captain Aleksandrs Nadeznikovs is working as General Manager of "LAPA Ltd" International Crewing Agents and Training Center for 15 years and has waste experience in recruiting, deployment, training of seafarers, developing short courses on request for Training Center and Conference sessions. He holds Master-Mariner Certificate of Competence.

Co-author Captain Nikolajs Romanovs is working as instructor in "LAPA Ltd." International Crewing Agents and Training Center. He holds Master-Mariner Certificate of Competence. He has waste experience in development and execution of in house training courses, also procedures development, implementation and follow up for Quality Assurance System working as Maritime Superintendent in "Interorient Navigation" Cyprus.

Authors of Article wish to express special thanks for their input to:

Mr. Rolf Westfal- Larsen Junior	- CEO of "Westfal-Larsen Shipmanagement" Bergen, Norway
Captain Igor Segeda	- Global Manager Marine Personnel of "Stolt Tankers" Rotterdam, the Netherlands
Captain Remko Kloos	- Director Personnel of "Anthony Veder Redereizaken b.v." Rotterdam, the Netherlands

Short history of shipping development

Since very beginning when mankind started to use floating crafts to move on water surface for fishing, trading, military purpose a need for special marine skills appeared for ship handling, navigation, cargo handling. People always were curious – what is behind the horizon. The bigger ships were built, the longer distances they could sail, but for many centuries wood and sail were kings at sea. There was certain specialization of ships already in Roman Empire – Navy, Merchant, Fishing. Probably one of the first bulk carriers was transporting grain from Egypt to metropolis. The first very basic national maritime legislation started to develop (Rhodian Law).

The dynamic of development started to change in the mid of 19th Century when new ship building technologies were invaded – metal hull, steam engine, electricity. This development had also required new competences – Engineer, Electrical Engineer. Further development, specification of cargoes, quantity to be transported, new sea routs and areas of shipping, all around the year navigation, industrial development and sea shelf resources research and production, communication technologies, new international and national legislation increased number of qualifications and competences which seafarers have to comply with (See Fig. 1 Illustration)

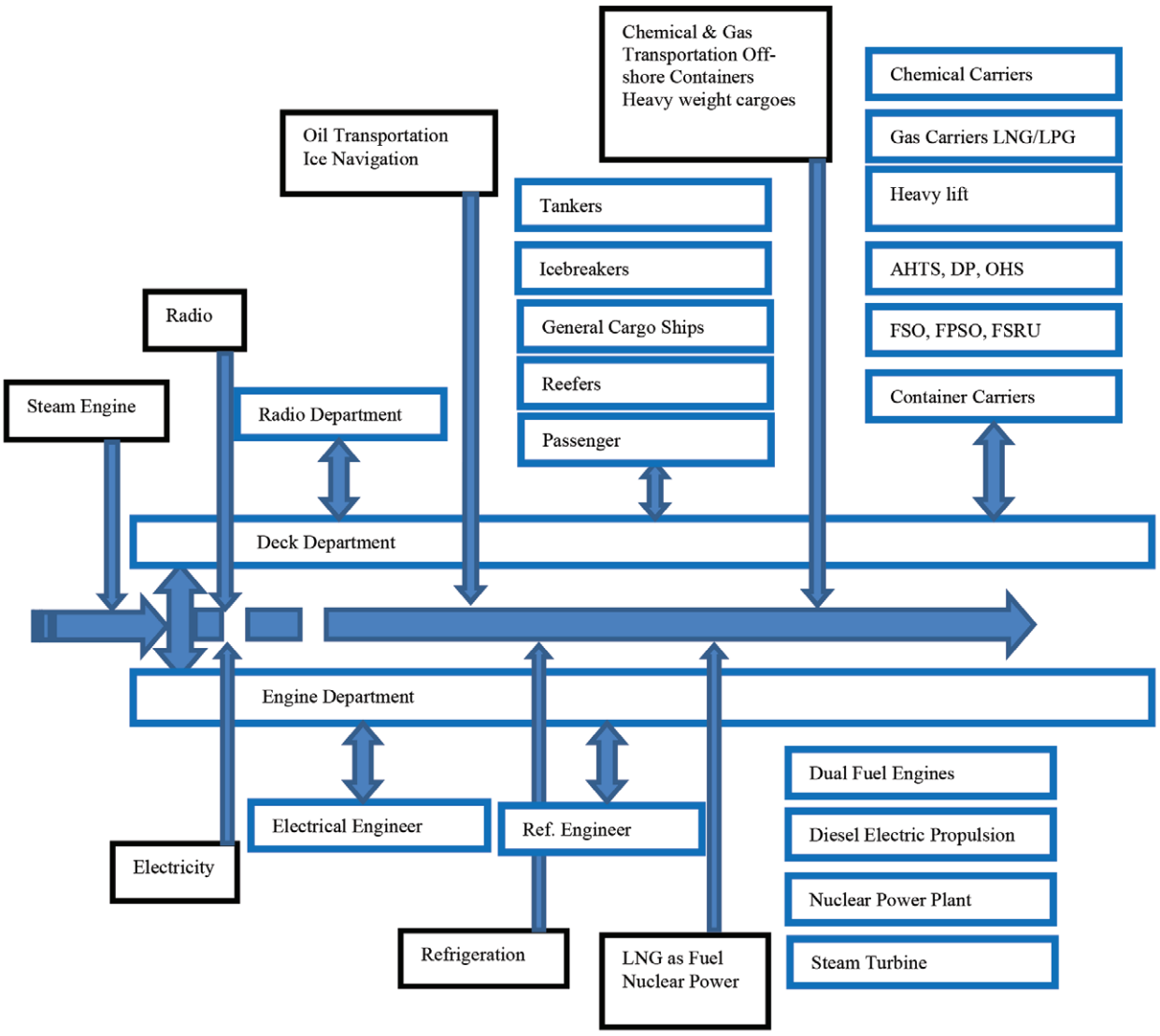


Fig. 1

The first Public International Maritime Organization which we know as IMO was founded in 1958, but it become influencing only in 1974. The IMO has prepared numerous international conventions concerning maritime safety including the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), the Standards for Training, Certification, and Watchkeeping (STCW), the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (Collision Regulations or COLREGS), Maritime Pollution Regulations (MARPOL), International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Convention (IAMSAR) and others.

Nowadays this development goes even more rapidly. Computer based technologies are changing working conditions, relationship and communication. The great issue with environment protection, climate changes, natural and energy resources brings more requirements and legislative acts. Information technologies bring ship owners and ship managers to great exposure to Media and consequently to society, which require from them to be even more concern regarding performance of their ships

Implementation of ISPS Code demonstrated how fast international maritime legislation can be changed, but there are more in the years to come, including full implementation of Manila Amendments 2010. Ship Owners and Ship Managers operating tankers are under constant scrutiny of Oil Majors and CDI to comply with OCIMF requirements.

Expectations and demands in Maritime Industry nowadays

Based on above mentioned we can say that Maritime Industry and consequently Ship Owners/ Operators have to meet and respond to following challenges:

1. Response to advance and sophisticated shipping technologies.

New equipment, appliances and technologies such as communication, ECDIS, dual fuel engines, ballast water treatment plant, sounding and control systems, pump systems, cooling systems, new type of fuel (LNG, Methanol), High Voltage equipment and others are coming and require new skills and familiarization training.

2. Response to fast changing international and national legislation.

Recently adopted or in process requirements of MLC 2006, Marpol Ch.6, Manila Amendments 2010, Ballast Water Treatment, Garbage Management require additional training for all crew.

3. Response to Clients requirements

Compliance with OCIMF, TMSA, SIGTTO, SDI etc. requires higher level of competence of the crew and compliance with Matrix requirements.

4. Response to multi functionality.

Small ships, short crew brings another issue as personnel on board has combined duties to substitute absent positions such as electrical offices, gas engineer, reefer engineer, radio officer. Short deck and engine crew brings us to General Purpose Rating.

5. Response to current environmental changes.

Piracy, military action areas, refuge/ rebels, terrorist thread, CO2/SOxx/NOxx emission requires additional attention including interaction with media, where a special training is necessary.

6. Response to maritime business globalization.

Working conditions in multicultural multilingual environment, worldwide trade – different countries/ports/languages – English as working language. Requires special skills in leadership, intercultural relations etc.

7. Response to company/ship specialization.

Special requirements and skills, unique equipment, technologies, procedures, now-how demand more training.

8. Response to intensity of traffic/trade.

Excessive work load requires fatigue training, Bridge Simulator training, shorter contracts.

Most of the responses are implemented as to following scheme (See Fig. 2).

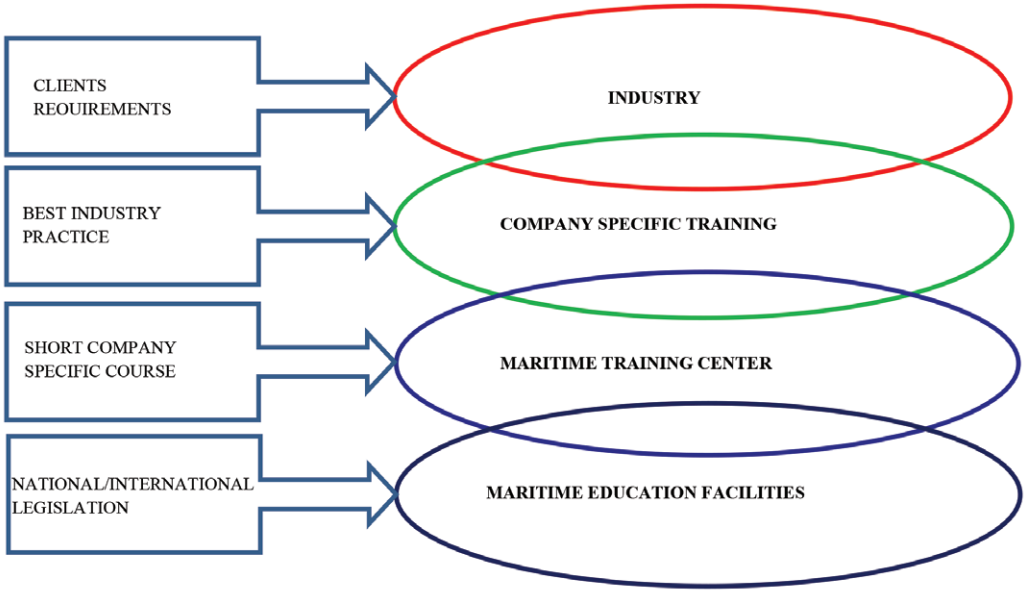


Fig. 2

Process of compliance and crew selection

Taking in account all mentioned above the companies establish processes to comply with the best industry practices (See Fig. 3) to be competitive on the market. These processes usually are stated in Companies Quality Assurance System. Part of this process is also selection, recruitment and employment of new seafarers as candidates.

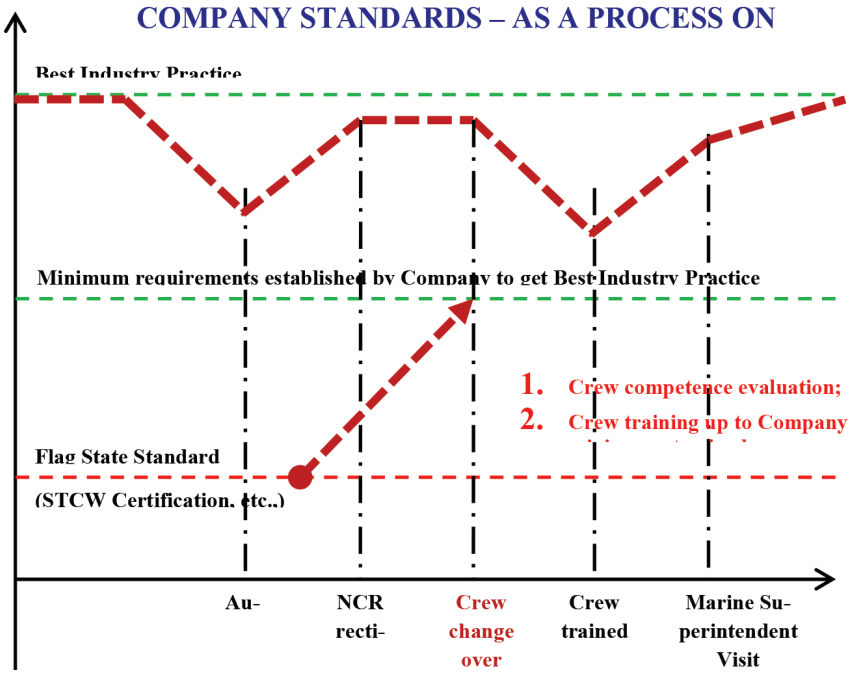


Fig. 3

Seafarer professional level basically consists from four following parts:

a) Education
b) Training
c) Skills
d) Attitude

The first two are the first level of recruitment – formal compliance with entry requirements and conventions, including interview and or professional tests.

The third one can be verified on simulators or on board during the first contract or overlapping. This is the second level of recruitment.

The fourth part can be assessed during the first contract or long term relationship with company. Alternative methods can be in deep interview or psychological tests.

In general it looks as following (See Fig. 4 and 5).

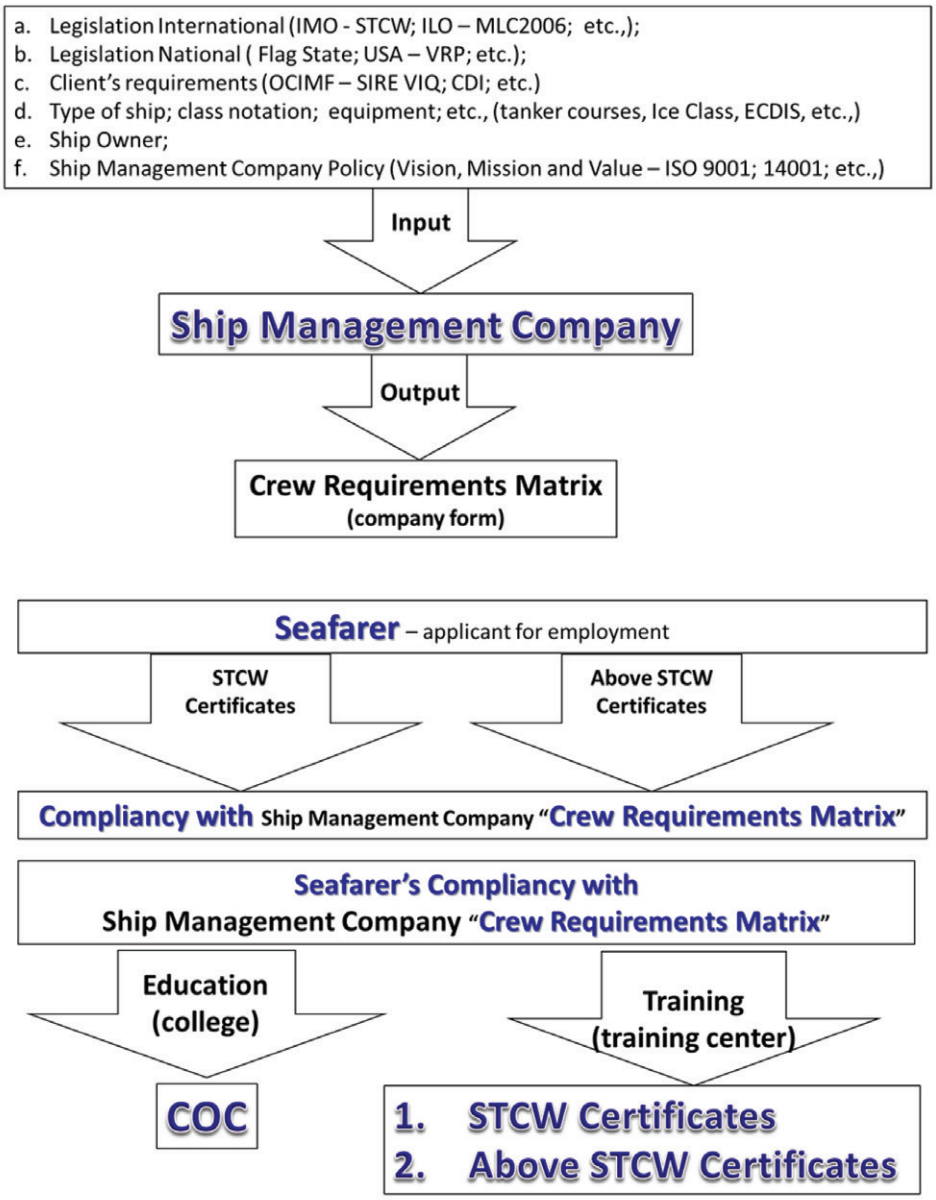


Fig. 4



Fig. 5

Ship Owners' opinion on development prospects of MET

We believe there will be a strong cost focus from owners on the MET also in the future. Owners will also demand clearer evidence of improved skills and knowledge as a direct result of conducting the training. In addition we think there will be a greater need for refresher courses coupled with competence tests to ensure that the knowledge has been retained some period after the training program has been completed. This will present some unique challenges to the MET industry. Competence verification is best done by an independent third party that both the training institute and the Ship Owner can rely on, but this sort of service is not readily available at the moment. Having training that is company specific (both in terms of equipment and procedures) will also be crucial, to avoid divergence between the course material and the operational requirement onboard.

Our opinion on development prospects of MET can be expressed as following suggestions:

— Ensure a well-balanced MET which both includes modern technology and continuous care taking of the classical seafarer skills.

— More use of virtual simulators to keep costs low, but also make the simulation more company and vessel specific.

— MET as a whole should be timely organized with module/step based training enabling the seafarers' skills to grow over the years in support of a long term career.

— Flexibility in the MET courses (ref the comment on refreshment/new training).

— Practical cases for discussion should preferably be used to a large extent during the academy years.

— A modern pedagogical approach to learning should be focused (reflective learning) at all levels of MET. From a Ship Owner perspective the learning and training is not completed with a shore course.

— Thus, enabling and focusing the seafarer to bring knowledge from Classroom/shore courses onboard and yet further develop competence/learning (both individually and for sharing amongst the colleagues) is of great importance for proper "on the job training".

— Actual learning and competence development at the course, and after (not a "tick in the box" training just to satisfy the requirements).

— To further develop a "reflective focus" of learning. One could, to a larger extent, combine the shore training and the work onboard. Some training ashore could be further improved with some tasks onboard (workbook?) up front or after the training.

In addition to that we suggest to focus on certain issues as:

— English language fluency – officers from countries where maritime education is run in English are having competitive advantage (India, Philippines, etc), stronger employment opportunities, brighter career chances.

— Psychological profiling – psychological wellness at sea is instrumental to safety and performance results. It is tough job to be out at sea and demands people who can withstand stress with strong mental health. The vast majority of incidents occurring at sea are often attributed to human error with variety of underlying problems.

— Development of soft and leadership skills. Historically, education of officers has been focused on occupational skills, while soft skills have been neglected. Modern maritime industry argues that, to ably steer a ships from A to B, officers also need cultural competence, emotional intelligence, social skills.

Another general note:

— The online training, where applicable, might be implemented by Training Center in addition to the existing format, provided the conditions for administration approval of such courses would be developed by the Flag State or Administration.

— The close contact with ship management companies and marine equipment manufacturers will be an advantage for Training Center for quick response to Shipping Industry demands to get properly trained crew.

Captain Aleksandrs Nadeznikovs
Captain Nikolajs Romanovs

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

УДК 62-05

И. И. Панков,
директор, ЧОУ «Учебно-тренажерный центр «Совкомфлот»;
Санкт-Петербург, Россия;

А. П. Смягликова,
педагог-психолог, ГУМРФ имени адмирала С. О.Макарова,
Санкт-Петербург, Россия;

В. Н. Окунев,
канд. техн. наук, доц.,
помощник генерального директора, ООО «СКФ Арктика»,
Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНО ВАЖНЫХ КАЧЕСТВ МОРЯКОВ

PSYCHOLOGICAL ASSESSMENT METHODS AS MEASURE OF CURRENT STATE OF SAILOR'S IMPORTANT PROFESSIONAL SKILLS

В статье поднимается вопрос ценности использования психологических методов диагностики в ходе процедуры отбора кандидатов для работы на судах как способа определения их уровня профессионально важных качеств. Авторы описывают первые результаты работы по данному направлению, а также обозначают возможности и перспективы применения профессиональной психологической диагностики в комплексе с традиционным подходом.

The article addresses the value of psychological diagnostic methods as the way of determining professionally important qualities of individual seafarers in the process of recruiting them for sea service. Authors report on the initial results and highlight potential and prospects of further use of psychological diagnostic methods in line with the traditional approach.

Ключевые слова: психологическая диагностика, профессиональные компетенции, профессионально-важные качества, моряки.

Key words: psychological diagnosis, professional competence, important professional skills, sailors.

НЕОБХОДИМОСТЬ повышения надежности человека как элемента комплексной системы управления предъявляет повышенные требования к профессиональным качествам моряков и эффективности процедуры отбора кандидатов для работы на судах. Решение этой задачи требует от судоходных компаний и индустрии в целом совершенствовать систему профессионального отбора плавсостава и внедрять в практику современные методы психологической диагностики, позволяющих определять текущее состояние профессионально важных качеств (ПВК) моряка. Под ПВК здесь понимается совокупность ряда когнитивных и личностных характеристик, которыми должен обладать моряк для успешного функционирования в рамках заданных профессиональных компетенций [1], [2].

В соответствии с программой инновационного развития ПАО «Совкомфлот» (СКФ) на период 2011–2015 гг., включающей, в том числе, создание единой профессиональной школы подготовки рядового и командного состава с учетом профессиональных, психофизиологических и личностных качеств моряков, на базе частного образовательного учреждения «Учебно-тренажерный центр «Совкомфлот» совместно с Государственным университетом морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова (ГУМРФ) в июле 2014 г. была создана лаборатория психологического сопровождения профессиональной деятельности плавсостава. Основной задачей лаборатории

на данном этапе является обеспечение возможности проведения комплексной профессиональной психологической диагностики плавсостава, позволяющей:

– определять текущее состояние ПВК у моряков;

– внедрять программы развития ПВК плавсостава как на этапе получения профессионального образования (в ГУМРФ или в УТЦ СКФ), так и в условиях работы на судах группы компаний;

– разрабатывать методические рекомендации по кадровой работе с учетом профессиональных, психофизиологических и личностных качеств моряков (профотбор, аттестация, назначение на вышестоящие должности).

Первым шагом в работе лаборатории стало проведение психологического тестирования курсантов ГУМРФ перед прохождением ими плавательской практики в 2014-2015 учебном году. Цель тестирования – выявить курсантов наиболее расположенных по своим личностным характеристикам к морской профессии.

В качестве основных параметров, обеспечивающих успешность профессиональной деятельности, были определены характеристики следующих качеств:

1) внимание (концентрация, переключаемость, помехоустойчивость);

2) мышление (оперативность, гибкость, скорость переработки информации);

3) коммуникативность (умение работать в команде, конфликтность);

4) индивидуальные характерологические особенности (способность к прогнозированию, стиль принятия решений, эмоциональные особенности состояния) [3].

Инструментом для выявления заявленных характеристик выступила психодиагностическая система (ПДС) «ЮНИПРО» (свидетельство о государственной регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент) № 2013660981 от 26.11.2013 г.). Система была разработана по заказу Группы компаний «Совкомфлот» в 2013 г. Фондом «Транспортная безопасность» с участием НОУ ВПО «Высшая школа психологии» в рамках научно-исследовательской работы по теме «Исследование и создание отвечающих современным требованиям программно-методических и диагностических средств инструментального измерения и оценок ПВК и ПНК моряков при профотборе и аттестации».

Для проведения психологической диагностики курсантов были использованы следующие методики: стандартизированный многофакторный метод исследования личности по Л. Н. Собчик (СМИЛ), тест определения работоспособности по Э. Крепелину, методика профиля состояния по Майерс-Бриггс. С помощью пакета этих методик в период с ноября 2014 г. по февраль 2015 г. было протестировано 85 курсантов ГУМРФ, обучающихся на факультете навигации и связи на 3-м (76 % от общего числа тестируемых) и 4-м (24 %) курсе. Из них 93 % – юноши, 7 % – девушки. Средний возраст тестируемых составил 20 лет.

В ходе тестирования был составлен психологический портрет курсанта как человека в относительно равной степени обладающего чертами как интроверсии (11,7 баллов из максимально возможных 29), так и экстраверсии (16,8 баллов), с преобладающим сенсорным способом получения информации (23,9 баллов) в противоположность интуитивному (7,9 баллов), мыслительным типом принятия решений (20,6 баллов) против чувствующего (8,6 баллов) и превалирующей решающей жизненной позиции (19,9 баллов) в сравнении с созерцательной (9,4 баллов). Высокие показатели по методике СМИЛ, определяющие ведущий пик личности, были выявлены по шкале «оптимистичность» (64,6 баллов), что отражает активную жизненную позицию, уверенность, позитивную самооценку и высокую мотивацию достижений; а низкие – по шкале «интроверсия» (43,8 баллов), что свидетельствует об общительности, открытости и высокой способности адаптации к стрессовым ситуациям. Коэффициент работоспособности равен 0,92 (при максимальном значении равном 1), что сигнализирует о наступлении определенного, но не критичного, уровня утомляемости в ходе выполнения монотонной деятельности.

Таким образом, в усредненном виде будущий выпускник ГУМРФ проявляет активную позицию, реалистичен, берет на себя ответственность за осуществляемые действия, склонен опираться на имеющийся опыт и использовать привычные способы решения проблем, предпочитает заранее

планировать свою деятельность, способен держать себя в руках в стрессовой ситуации, обладает высоким уровнем мотивации. Вместе с тем, возможны проявления затруднений и неэффективного поведения в неоднозначных ситуациях, упущение из виду изменений в окружающей обстановке, нетерпеливость и как следствие ошибки при длительных и монотонных работах.

Полученные психологические портреты курсантов были соотнесены с представленным в ПДС «ЮНИПРО» «средним портретом» фокус-группы, состоящей из 305 моряков СКФ (капитаны, старшие помощники капитана и старшие механики) для определения наиболее успешных претендентов среди учащихся.

На основе полученных результатов были составлены психологические заключения и разработаны рекомендации для круинговой компании ООО «Юником СПб», с учетом которых была набрана целевая группа из 15 человек для прохождения практики на судах Группы компаний «Совкомфлот» в 2015 г.

В заключение необходимо отметить, что психологическое тестирование может быть применено как при профотборе для выявления текущих профессионально важных качеств моряков, так и для совершенствования выявленных ПВК в ходе специализированных тренингов.

Список литературы

1. *Даниленко А. А.* Психологические основы управления на морском транспорте: учебник. — СПб. 2011. — 512 с.

2. *Козик С. В.* Профессионально важные качества судоводителя и их формирование: учебно-методическое пособие. — СПб., 2013. — 134 с.

3. Отчет к договору № БН от 1 августа 2012 / Фонд «Транспортная безопасность». — М., 2013. — 57 с.

РЕЗОЛЮЦИЯ ПО ИТОГАМ КОНФЕРЕНЦИИ

представителей морских учебных заведений, Морских Администраций
и представителей судоходных компаний, являющихся участниками
Международной Конференции и трехстороннего круглого стола,
организованного Министерством транспорта Российской Федерации
совместно с ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова,

Тема круглого стола: Совместная деятельность учебных заведений, Морских Администраций и судоходных компаний в подготовке плавсостава

Санкт-Петербург, 7 июля 2015

Участники Международной Конференции и трехстороннего круглого стола, созванного в ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова в Санкт-Петербурге, Российская Федерация, выразили свое принципиальное согласие в следующем:

1. УЧИТЫВАЯ инициативу ИМО об объявлении 2015 года Годом морского образования и

2. ПРИЗНАВАЯ важность морского образования и практической подготовки кадров для развития судоходства, и **ПРИНИМАЯ ВО ВНИМАНИЕ** заявление Генерального секретаря ИМО на Международном симпозиуме о подготовке моряков, проходившем во Всемирном Морском Университете в этом году о том, что *«Эффективные стандарты подготовки моряков остаются основой надежности и безопасности судоходной индустрии, которая нуждается, в сохранении качества, практических навыков и компетенции квалифицированных человеческих ресурсов».*

3. ПОНИМАЯ ТАКЖЕ, что аварийность в мореплавания в большинстве случаев происходит из-за некачественного образования и практической подготовки плавсостава; и что эти вопросы, относящиеся к человеческому фактору, тесно связаны с условиями и степенью безопасности на море, а также с вопросами охраны и защиты окружающей среды, и что качественная и эффективная плавательная практика является основным компонентом системы подготовки плавсостава в соответствии с Конвенцией и Кодексом ПДНВ 1978 и составляет не менее 25% от общей программы подготовки.

4. ССЫЛАЯСЬ на «Санкт-Петербургское заявление 2009 года» Международной Ассоциации Морских Университетов о том, *что постройка новых и все более технически сложных судов и портов для удовлетворения роста и спроса на торговлю морем, наряду с новыми требованиями ИМО для регулирования безопасности, охраны и защиты природы, требуют более, чем когда-либо, хорошо практически подготовленных и образованных кадров, как на судах, так и на берегу. Эта потребность создает много вызовов в плане образования, профессиональной подготовки и развития карьеры моряков. Ключевым элементом обеспечения надлежащего качества и соответствующего уровня подготовки является необходимость стимулирования введения инноваций в морской отрасли. Это необходимо и для поддержки соответствующих морских научных исследований, а также для содействия созданию новых технологий в судоходстве и в области морского образования, и так же для поддержания эффективности процессов подготовки высококвалифицированных преподавателей, инструкторов, экспертов, ученых и других кадров, связанных с человеческими ресурсами и качеством эффективных исследований в ключевых направлениях.*

5. УЧИТЫВАЯ исключительную важность выше перечисленных положений, и принимая во внимание объявление ИМО 2015 года, как года Морского Образования, участники Конференции и Трехстороннего Круглого Стола в результате обсуждений пришли к соглашению, что:

5.1 Инициатива ИМО об объявлении 2015 года годом Морского Образования является необходимой и своевременной. Продвижение и популяризация этой инициативы поможет привлечь интеллектуальные и мотивированные человеческие ресурсы в морские учебные заведения и в судоходную индустрию. Участники также считают, что Манильские поправки к Конвенции ПДНВ 78 и должная реализация системы стандартов качества в подготовке плавсостава направлены на повышение качества подготовки, включая плавпрактику.

5.2 Участники конференции и круглого стола полностью поддерживают инициативу ИМО по созданию программы **Морских Представителей ИМО**, в функции которых входит распространение мотивированной и положительной информации о мореплавании, в частности, среди молодых людей, находящихся в начале своего пути по выбору профессии.

5.3 Следует считать целесообразным, чтобы морские образовательные учреждения, Морские Администрации и судоходные компании сосредоточили свою совместную деятельность на обсуждении и решении насущных проблем подготовки плавсостава на основе взаимного сотрудничества путем обмена информацией и созыва конференций и трехсторонних круглых столов на регулярной основе, для обсуждения и оценки результатов их совместной деятельности, что должно способствовать прогрессу в подготовке кадров в областях, представляющих взаимный интерес.

В ознаменование проведения Международной конференции и круглого стола в ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова Резолюции присваивается название **«Подготовка плавсостава, Санкт-Петербург 2015»**.

INTERNATIONAL PRACTICAL-RESEARCH CONFERENCE "MARITIME EDUCATION AND TRAINING: TRENDS & CHALLENGES IN THE XXI CENTURY"

JOINT RESOLUTION

of the Conference and Tripartite Round Table Forum convened by the Ministry of Transport of the Russian Federation jointly with Admiral Makarov SUMIS and Representatives of MET Institutions, Maritime Administrations and the Shipping Industry

Round Table Forum: Synergy of educational institutions, maritime administrations and shipping companies in training of seafarers

Saint Petersburg, 7th of July 2015

Participants of International Conference and Tripartite Round Table Forum met at the Admiral Makarov SUMIS in Saint Petersburg, Russian Federation, agreed in principle as set forth below:

1. TAKING INTO CONSIDERATION THE IMO initiative of designation 2015 year as the Year of Maritime Education and Training and

2. RECOGNIZING the importance of Maritime Education and Training for development of Shipping Industry and **TAKING INTO ACCOUNT** the IMO Secretary-General statement at the International MET Symposium in WMU this year, that "Effective standards of training remain the bedrock of a safe and secure shipping industry, which needs to preserve the quality, practical skills and competence of qualified human resources"

3. UNDERSTANDING ALSO, that accidents at sea in the most of cases originate from substandard MET which results in substandard skill levels of Officers and Crew; and that such Human Factor issues are highly correlated to conditions of industry Safety, Security and Environment Protection levels and that On-Board Training (OBT) is a core component of Maritime Education and Training system to comply with 1978 STCW Convention and Code, as amended and which composes around 25% of all time period of MET process.

4. REFERRING ALSO to IAMU "Saint Petersburg Statement of 2009", *that the building of new and ever more technically sophisticated ships and port systems to meet this increase demand for seaborne trade, along with new IMO requirements for regulating safety, security, protection of environment, will demand, more than ever well trained and educated personnel both on board and ashore. This need presents many challenges in terms of education, training and career development of seafarers. A key element to insure the proper quality and appropriate level of MET, to stimulate innovation in the maritime industry, to support related marine research, and to facilitate the creation of new technologies in shipping and MET, supporting the education and training of highly qualified lecturers, instructors, assessors, scientists and related other human resources to effect quality research on crucial topics.*

5. BEARING IN MIND THE CRITICAL IMPORTANCE of all the above and taking into account that IMO announced 2015 year as Year of Maritime Education and Training, the participants of Conference and Round Table Forum hereby confer and agree that:

5.1. The IMO Initiative of designation the 2015 as a year of Maritime Education and Training is **Appropriate and Timely**, and also believe that the promoting and popularization this initiative can attract intelligent and dedicated persons to a career in MET institutions and the maritime industry. The participants also consider that the Manila amendments to STCW 78 Convention and due implementation of Quality Standard System for MET process aimed at improving of quality of MET, including the OBT.

5.2. The Conference and Round Table Forum participants completely support the IMO initiative on establishing **IMO Maritime Ambassador scheme.** IMO Maritime Ambassadors are encouraged to share their passion about the maritime world with others, particularly young people who are starting out on their further education, apprenticeships and career pathways.

5.3. It is reasonable that MET Institutions, Maritime Administrations and Ship-owners clearly focus their activities together to solve the MET challenges through mutual collaboration by sharing of information and convening the MET Conferences and Tripartite Round Table Forums on regular basis to review and assess the results of their joint activity which should promote the progress in MET in the areas of shared concern.

In commemoration of the calling of this International Conference and Tripartite Round Table Forum at Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping this Resolution is to be referred to as **"MET, Saint Petersburg Resolution of 2015".**

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Афонин Андрей Борисович
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
andrey.afonin.gma@yandex.com

Барышников Сергей Олегович
Доктор технических наук, профессор
Ректор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
rector@gumrf.ru

Белов Леонид Борисович
Кандидат технических наук, доцент
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
bel.new@mail.ru

Бондаренко Александр Валентинович
Кандидат технических наук, доцент
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова (Украина)
abondarenko70@mail.ru

Боровикова Ирина Анатольевна
Кандидат технических наук, доцент
СПбГМТУ
8 (812) 714-29-49

Булгаков Владимир Павлович
Доктор технических наук, профессор
Астраханский государственный технический университет
mbulgak@mail.ru

Голоскоков Дмитрий Петрович
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
GoloskokovDP@gumrf.ru

Григорьев Андрей Владимирович
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
a.grigorev@eds-marine.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

Ершов Андрей Александрович
Доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
ershov_63@mail.ru

Жиленков Антон Александрович
Кандидат технических наук
Керченский государственный морской технологический университет
sergiiblack@gmail.com

Жуков Владимир Анатольевич
Доктор технических наук, доц.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
gukovv@rambler.ru

Зубарев Юрий Яковлевич
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
yuri.zubarev@gmail.com

Ибрагимов Дамир Ирекович
Старший преподаватель
Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)
captainvmf@yandex.ru

Ильинский Юрий Юрьевич
Начальник учебной части военно-морского отдела учебного военного центра
Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)
gera210307@yandex.ru

Карклина Татьяна Осиповна
Кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
kaf_sopromat@gumrf.ru

Кириченко Александр Викторович
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
a.v.kirichenko@mail.ru

Кожухов Игорь Валентинович
Кандидат географических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
pontida@mail.ru

Колосков Евгений Николаевич
Аспирант
Научный руководитель:
Фирсов Юрий Георгиевич,
кандидат технических наук, доцент,
gidrograph@mail.ru
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
evgenklskv@mail.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

Кукушкин Иван Викторович
Аспирант
Научный руководитель: Зубарев Юрий Яковлевич,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
Iron-win@mail.ru

Кулагин Юрий Александрович
Соискатель, начальник отдела
ЗАО «НПЦ «Электродвижение судов»
kulagin@eds-marine.ru

Куликов Валентин Александрович
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
valekulikov@yandex.ru

Курников Александр Серафимович
Доктор технических наук, профессор
ФБОУ ВПО «ВГУВТ»
kaftkm@vgavt-nn.ru

Лутков Сергей Алексеевич
Кандидат технических наук, доцент
Институт водного транспорта имени Г. Я.Седова
lutkov@aaanet.ru

Малыхин Михаил Олегович
Генеральный директор
ООО «Имекс»
m.malykhine@gmail.com

Мартьянов Владимир Васильевич
Старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
martjanv-vladimir@rambler.ru

Мизгирев Дмитрий Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент
ФБОУ ВПО «ВГУВТ»
kaftkm@vgavt-nn.ru

Мойсеенко Сергей Сергеевич
Доктор педагогических наук,
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Калининградский
технический университет»,
Балтийская государственная академия
рыбопромыслового флота
moiseenkoss@rambler.ru

Надежников Александр
Капитан, генеральный директор,
член совета директоров
LAPA Ltd. — International Crewing Agents
and Training Center, Рига, Латвия
aleksandrs.nadeznikovs@lapa.lv

Наумов Виктор Степанович
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
naumov1@vgavt-nn.ru

Нгуен Ньян
Аспирант
Научный руководитель:
Рубан Анатолий Рашидович,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
nhannguyen.ast@gmail.com

Некрасов Валерий Александрович
Доктор технических наук, профессор
Национальный университет
кораблестроения имени
адмирала Макарова (Украина)
valeriy.nekrasov@gmail.com

Некрасова Анна Алексеевна
Аспирант
Научный руководитель:
Соколов Сергей Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент
SokolovSS@gumrf.ru
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
anna14_06@mail.ru

Нестерова Ольга Сергеевна
Аспирант
Научный руководитель:
Наумов Виктор Степанович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
naumov1@vgavt-nn.ru

Носкова Екатерина Викторовна
Кандидат технических наук, доцент
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
katerina.noskova@mail.ru

Окунев Василий Николаевич
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
Помощник генерального директора
ООО «СКФ Арктика», Санкт-Петербург, Россия
v.okunev@scf-group.ru

Павлов Анатолий Владимирович
Аспирант
Научный руководитель:
Чистов Валентин Борисович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
Denver_toropec@mail.ru

Панков Игорь Иванович
Директор ЧОУ УТЦ «Совкомфлот»,
Санкт-Петербург, Россия
ipankov@scf-group.ru

Родимов Николай Владимирович
Аспирант
Научный руководитель:
Сивоконь Владимир Павлович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
NRLoki514@gmail.com

Романов Николай
Капитан, инструктор
LAPA Ltd. — International Crewing Agents
and Training Center, Рига, Латвия

Рубан Анатолий Рашидович
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
a.ruban1974@mail.ru

Сазонов Анатолий Ефимович
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
sazonst@yandex.ru

Сероветников Андрей Сергеевич
Научный сотрудник
ИКИР ДВО РАН
sas-w@yandex.ru

Сивоконь Владимир Павлович
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
vsivokon@mail.ru

Соколов Сергей Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
SokolovSS@gumrf.ru

Смягликова Анастасия Петровна
Педагог-психолог
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
A.Smyaglikova@scf-group.ru

Степанов Андрей Львович
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
stepanov-gma@mail.ru

Тарануха Светлана Николаевна
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
Svtar64@mail.ru

Тезиков Александр Львович
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
altezikov@yandex.ru

Тимофеева Ольга Алексеевна
Аспирант
Научный руководитель:
Васин Андрей Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
andrejvasin@gmail.com
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
timofeeva_o_a@inbox.ru

Титов Иван Леонидович
Аспирант
Научный руководитель:
Черный Сергей Григорьевич,
кандидат технических наук, доцент
Керченский государственный морской
технологический университет
vanya-titov-1993@mail.ru

Уксусов Сергей Семенович
Старший преподаватель
Астраханский государственный
технический университет
mbulgak@mail.ru

Федюк Роман Сергеевич
Старший преподаватель
Дальневосточный федеральный
университет (ДВФУ)
roman44@yandex.ru

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

Хухарев Дмитрий Андреевич
Аспирант
Научный руководитель: Ершов Андрей Александрович, доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
ershov_63@mail.ru

Цапко Людмила Андреевна
Старший преподаватель Астраханский государственный технический университет
mbulgak@mail.ru

Черепкова Екатерина Алексеевна
Кандидат технических наук ФБОУ ВПО «ВГУВТ»
echer-nn@mail.ru

Чертков Александр Александрович
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
chertkov51@mail.ru

Черный Сергей Григорьевич
Кандидат технических наук, доцент
Керченский государственный морской технологический университет
sergiiblack@gmail.com

Чистов Валентин Борисович
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
ChistovVBgumrf.ru

Ястреба Алексей Петрович
Старший преподаватель
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова (Украина)
towandtow@mail.ru

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Выпуск 4 (32)

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 20.08.15. Формат 60x90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 30,75. Тираж 500 экз. Заказ № 406/15

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7