

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 1 (35)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2016**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2016. — Вып. 1 (35). — 226 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»; **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, 2016

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

Галин А. В. Воздействие ограничений на обобщенную имитационную модель процесса развития портов 7

Ермаков С. В. Методика сравнительного анализа критериев выявления промахов в измерениях навигационных параметров 15

Бурмака И. А., Астайкин Д. В., Алексейчук Б. М. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях 24

Ксенофонтов Ю. Г., Пивоваров А. Н. К вопросу о проектировании периметральных охранных систем для морских объектов 29

Савчук В. Д., Хомяков В. Ю. Расчет координат центра тяжести штабеля груза при дифференте малотоннажного судна 36

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 47

Барашок П. И., Фирсов Ю. Г. Современные способы обследования морского дна для обнаружения и устранения взрывоопасных объектов до строительства трубопровода 47

Кузьмицкий М. Л., Ксенофонтов Н. М., Чистов В. Б. Расчетные исследования влияния коррозионного износа на прочность металлоконструкций ворот и затворов шлюзов 60

Колосков Е. Н. Взаимосвязь гидрографии и геоэкологии в контексте глобальных климатических изменений в арктических морях и их последствия 66

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 76

Лазарев А. Н., Марченко С. С. Теоретические аспекты модернизации судов смешанного «река – море» плавания 76

Шарифов З. З., Ханкишиев И. А. Сопротивление хрупкому разрушению металла судовых конструкций и их сварных соединений при испытаниях на ударный изгиб до и после коррозии 85

Сахно К. Н., Дьяков А. С., Во Ч. К. Совершенствование технологии изготовления трубопроводов по проектной информации при использовании приварных соединений труб 91

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 99

Безюков О. К., Афанасьева О. В., Денисова А. А. Построение критериального уравнения технического уровня судовых топливных расходомеров с помощью метода анализа размерностей 99

Живлюк Г. Е., Петров А. П. Состояние и перспективы совершенствования систем топливоподачи Common Rail 108

Хлюпин Л. А. Причальные устройства для заправки судов сжиженным природным газом 123

Леонтьев Л. Б., Леонтьев А. Л., Макаров В. Н. Влияние эксплуатационных факторов на отказы подшипников скольжения коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей и пути повышения их надежности 129

Белецкий Е. Н. Различные уровни моделирования сложных конструкций судовых энергетических установок, отдельные элементы которых выполнены из композиционных полимерных материалов 138

выпуск 1(35)
2016

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

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.
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.
А. Л. Кузнецов,
д.т.н., проф.
Е. А. Лаврентьева,
д.э.н., проф.
А. Ю. Ластовцев,
к.т.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.
В. И. Решняк,
д.т.н., проф.
В. В. Романовский,
д.т.н., проф.
А. А. Сикарев,
д.т.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
В. И. Черненко,
д.т.н., проф.
В. Б. Чистов,
д.т.н., проф.

Кукарина А. Ю., Миронов А. И., Рубан А. Р. Влияние износов дейдвудных подшипников и гидродинамического момента на устойчивость вращения гребного вала 145

Гаврилов В. В., Мащенко В. Ю. Теоретические основы и методика анализа процесса горения в судовом ДВС по индикаторным диаграммам 154

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 165

Григорьев А. В., Зайнуллин Р. Р., Малышев С. М. Перспективы внедрения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте 165

Каретников В. В., Пащенко И. В., Зайцев А. И. Основные аспекты использования современных инфокоммуникационных технологий для обеспечения беспилотного судовождения на водном транспорте 170

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ТРАНСПОРТЕ 180**

Сахаров В. В., Чертков А. А., Дмитриев А. А. Алгоритм трафика перевозки грузов с обеспечением минимума транспортной работы 180

Голоскоков Д. П. Модель судового перекрытия как конструктивно-ортотропной пластины 189

Тындыкарь Л. Н. Разработка метода организации движения информационных потоков образовательного процесса 197

Матвеев А. А., Кузнецов В. Н., Гаскаров В. Д. Обзор технических средств и методов спутниковой навигации судов 207

Кривцова И. Е., Салахутдинова К. И., Юрин И. В. Метод идентификации исполняемых файлов по их сигнатурам 215

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	7
<i>Galin A. V.</i> The restrictions effect on a generalized imitation model of the development process of ports	7
<i>Ermakov S. V.</i> Method of comparative analysis of criteria for the identification outlier in the measurements navigation parameters	15
<i>Burmaka I. A., Astaykin D. V., Alekseychuk B. M.</i> Estimation of efficiency of coordinates of ship at surplus measurings	24
<i>Ksenofontov Yu. G., Pivovarov A. N.</i> To the question of design of perimetralny security systems for sea objects	29
<i>Savchuk V. D., Khomyakov V. Ju.</i> The calculation of the coordinates of center of gravity of a cargo stack at the trim of small-displacement vessel	36
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	47
<i>Barashok P. I., Firsov Yu. G.</i> Modern methods of the seafloor investigations for the explosive objects detection before the pipeline construction	47
<i>Kuzmitskiy M. L., Ksenofontov N. M., Tchistov V. B.</i> Calculated research influence corrosive wear on strength metal constructions gates navigation lock	60
<i>Koloskov E. N.</i> The interdependence of hydrography and marine ecology in the context arctic seas climate change and its consequences	66
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	76
<i>Lazarev A. N., Marchenko S. S.</i> Theoretical aspects of modernization of mixed «river-sea» navigation vessels	76
<i>Sharifov Z. Z., Khankishiev I. A.</i> Resistance to brittle fracture metal ship constructions and their welded joints at testing the impact strength before and after of corrosion	85
<i>Sakhno K. N., Dyakov A. S., Vo T. Q.</i> Improving the technology of pipelines project information using a welded pipe joints	91
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	99
<i>Bezyukov O. K., Afanasyeva O. V., Denisova A. A.</i> Technical level's criteria for ship fuel gauge construction using the method of dimensional analysis	99
<i>Zhivlyuk G. E., Petrov A. P.</i> Status and prospects of perfection of fuel supply system Common Rail	108
<i>Khlyupin L. A.</i> Mooring facilities for refueling of vessels compressed natural gas	123
<i>Leontev L. B., Leontev A. L., Makarov V. N.</i> Influence operational factors on failure bearing cranked shafts of marine medium-speed diesels and ways to improve their reliability	129
<i>Beleckij E. N.</i> Different levels of modeling of complex structures marine power plants, the individual elements of which made of composite polymer materials	138
<i>Kukarina A. Ju., Mironov A. I., Ruban A. R.</i> The effect of wear of stern bearings and hydrodynamic moments on stability of rotation of the propeller shaft	145
<i>Gavrilov V. V., Mashchenko V. Yu.</i> Theoretical foundations and procedure of the analysis of process of combustion of ship internal combustion engines according to indicator diagrams	154

edition **1(35)**
2016

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

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.
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.
A. L. Kuznecov,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences, Prof.
A. Yu. Lastovtsev,
candidate of technical 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.
V. I. Reshnyak,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. A. Sikarev,
doctor of technical 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
V. I. Chernenko,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. A. Yershov,
doctor of technical Sciences,
Associate Prof.
A. P. Gorobtsov,
candidate of technical Sciences,
Associate Prof.
B. A. Smyslov,
Candidate of Law, Prof.
A. Yu. Sharonov,
candidate of Geography, Associate Prof.
A. Ye. Sazonov,
doctor of technical Sciences, Prof.

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 165

Grigoryev A. V., Zaynullin R. R., Malyshev S. M. Opportunities of introduction
of ship valve gas turbogenerators in marine fleet 165
Karetnikov V. V., Pashchenko I. V., Zaytsev A. I. Highlights of use modern
information and communication technologies to provide unmanned navigation
on water transport 170

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 180

Saharov V. V., Chertkov A. A., Dmitriev A. A. Ensuring minimum transport
work algorithm for goods traffic 180
Goloskokov D. P. Model of ship's overlappings as a constructive-orthotropic
plate 189
Tyndykar L. N. Development of method for organization information support
to educational process 197
Matveev A. A., Kuznetsov V. N., Gaskarov V. D. A review of the technical means
and methods of satellite navigation ships 207
Krivtsova I. E., Salakhutdinova K. I., Yurin I. V. Method of executable filts
identification by their signatures 215

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК 656.1

А. В. Галин

ВОЗДЕЙСТВИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ОБОБЩЕННУЮ ИМИТАЦИОННУЮ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ПОРТОВ

В работе проведен анализ разработанной автором количественной модели развития портов. Выявлено, что модель работает в идеальных условиях, характеризующихся неограниченными доступными ресурсами для роста порта. Определены основные возможные ограничения, влияющие на развитие порта, изучено их индивидуальное и совместное воздействие на систему. Обоснована необходимость внесения изменений в созданную модель для учета влияния выявленных ограничений. Разработаны и обоснованы алгоритмы работы имитационной модели, учитывающие влияние выявленных ограничений. Проведены испытания работы модели при различных вариантах воздействия ограничений. Определена адекватность работы имитационной модели в новых условиях. Показано, что модель, предложенная в работе, является математическим аппаратом, учитывающим определенное влияние внешних сил. Модель не только объясняет существующее состояние порта и причины, приведшие к нему, дает определенный прогноз развития в будущем, но и делает это в реальных условиях воздействия на систему внешних факторов, что является наиболее ценным для практического применения.

Ключевые слова: порт, терминал, имитационная модель, логистика.

Анализ количественной модели

Количественная модель, предложенная в предыдущей работе автора [1], основана на дескриптивной модели Конференции ООН по торговле и развитию (UNCTAD) 1985 г. [2] – [5]. Эта качественная модель UNCTAD представляет собой концепцию развития портов, обобщающую полученные различными учеными и специалистами результаты, делая основной упор на грузоведческих аспектах портовых операций [6]. Представленная количественная модель работает в идеальных условиях, характеризующихся неограниченными ресурсами — любым потребным количеством причалов для обработки различных типов грузов и наличием неограниченного специализированного флота, способного перевезти любое количество груза. На самом деле, порты развиваются в условиях ограниченных ресурсов.

Известны два основных ограничения, влияющих на процесс развития порта, — это существующий (точнее, доступный) рынок судов и наличие (или возможность создания) специализированных причалов для перевалки грузов. Под рынком существующих судов понимается имеющиеся в наличии специализированные суда или финансовая возможность их постройки. Доступный рынок специализированных судов определенных размеров и типов ведет к развитию специализированных причалов для обработки определенных типов грузов и, следовательно, обеспечивает приоритет в развитии переработки этих типов грузов через порт. Доступное количество судов каждого типа определяет, в свою очередь, необходимое количество специализированных причалов для перевалки груза этого типа и его количество, и таким образом ограничивает поток определенных видов груза через порт. Количество доступных причалов ограничивается как естественными факторами — общей длиной береговой линии, так и экономическими факторами — наличием финансовых возможностей. Характеристики причалов влияют на используемый флот. Например, глубина у причалов и на подходе фарватере влияет на размеры используемых судов. Размеры обрабатываемых судов, в свою очередь, оказывают ответное влияние на тип и количество перегрузочной техники на причале, определяют скорость обработки судов и пропускную способность причала, что в совокупности влияет на объем и структуру грузопотока, проходящего через порт [7], [8].

Таким образом, модель должна учитывать влияние существующих ограничений на развитие порта, а также взаимное влияние ограничений друг на друга и совместное воздействие их на развитие порта в освоении меняющегося грузопотока (рис. 1).



Рис. 1. Совместное влияние ограничений на развитие порта в освоении меняющегося грузопотока

Под влиянием рассмотренных ограничений формируется направление и устанавливаются пределы развития порта, т. е. происходит отбор из общего потока тех видов грузов и в том количестве, которое порт способен обработать на своих причалах и который может быть вывезен существующим тоннажем [9], [10]. Избыточный грузопоток будет перераспределен в другие порты побережья, где продолжит свое существование и развитие (рис. 2).

Исходя из сказанного, для корректного отражения реальности в концепцию модели развития порта необходимо ввести указанные ограничения и проверить адекватность полученной модели.

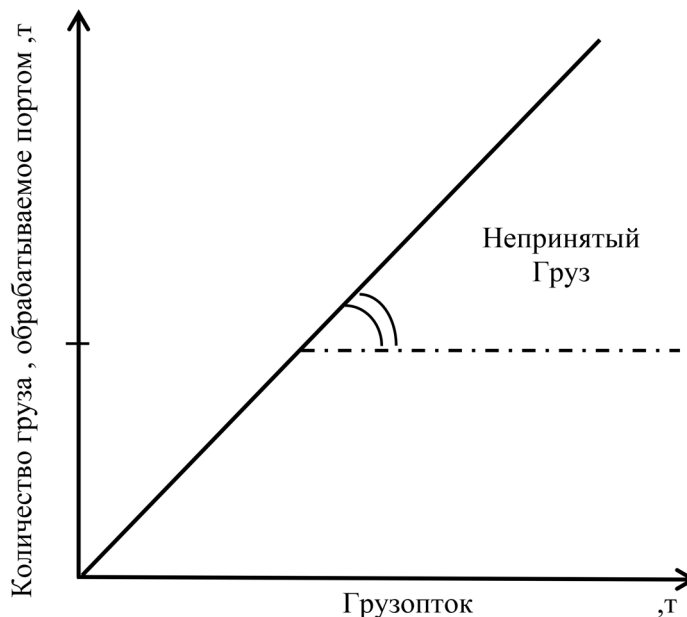


Рис. 2. График обработки грузопотоков на причалах

Концепция количественной модели в условиях ограниченных ресурсов

В модель необходимо ввести три ограничения: наличие флота, наличие причалов и наличие взаимного влияния этих ограничений.

Для реализации ограничения по имеющемуся флоту необходимо добавить в созданную модель алгоритм проверки соответствия решения существующему количеству судов, т. е. необходимо выполнить сравнение потенциального грузопотока с тем количеством данного вида груза, которое возможно перевезти на существующем специализированном тоннаже и использовать меньшее значение (рис. 3).

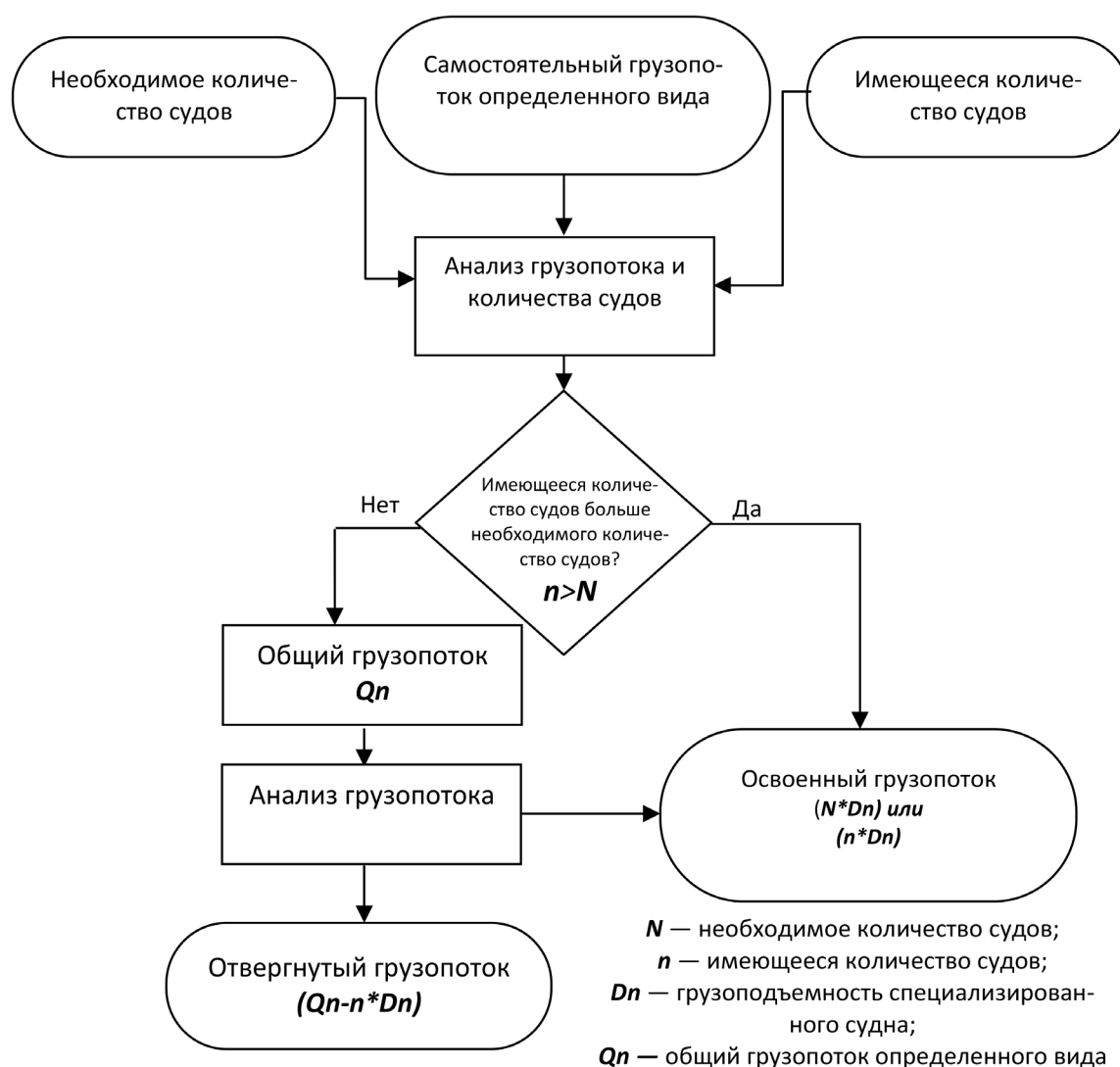


Рис. 3. Схема определения ограничений по флоту

Для введения ограничения по числу доступных причалов по каждому грузопотоку необходимо добавить в существующую модель алгоритм проверки на соответствие решения установленному ограничению и осуществить сравнение потенциального грузопотока определенного типа груза с тем количеством груза данного типа, которое возможно обработать на существующих специализированных причалах и использовать наименьшее значение (рис. 4).

В связи с тем, что наличие доступного флота может не соответствовать производительной способности причалов, необходимо разработать алгоритм сравнения полученных результатов освоения грузопотока по флоту и порту и выбрать наименьшее значение, которое и будет характеризовать принятый портом грузопоток (рис. 5).

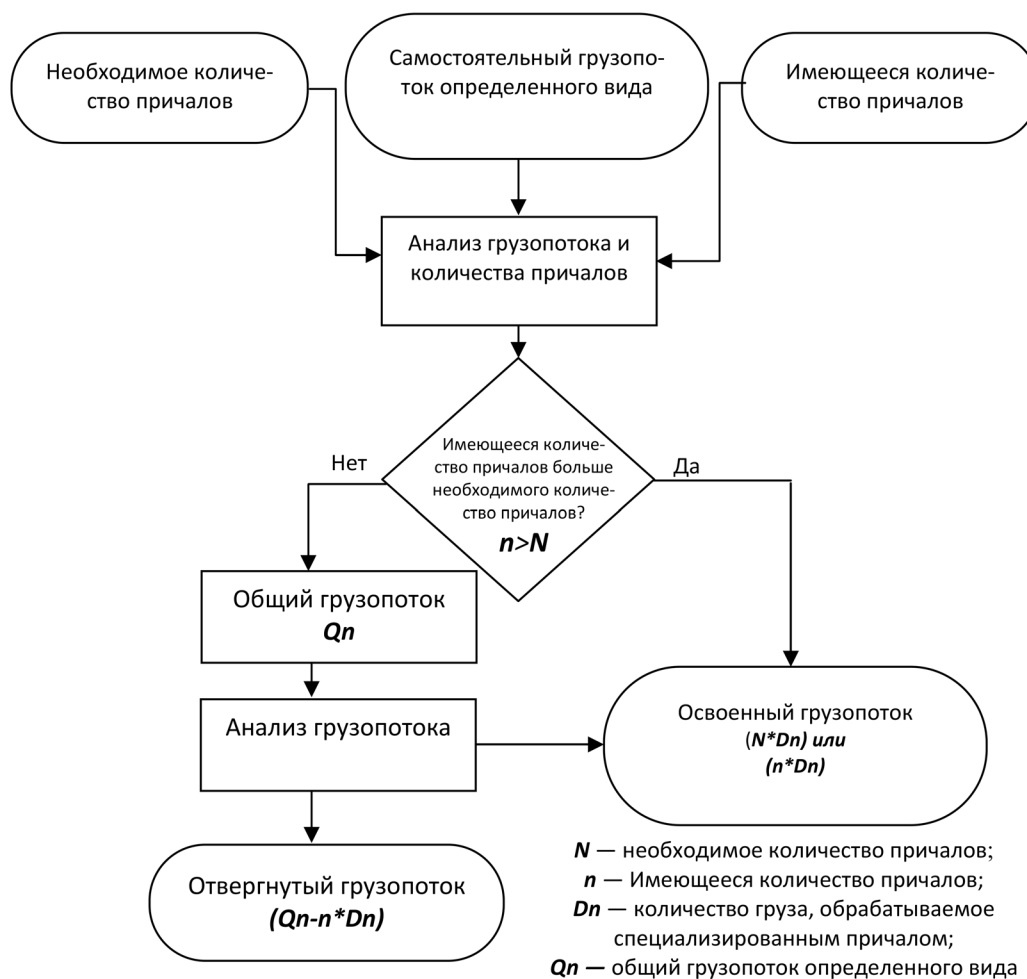


Рис. 4. Схема определения ограничений по причалам

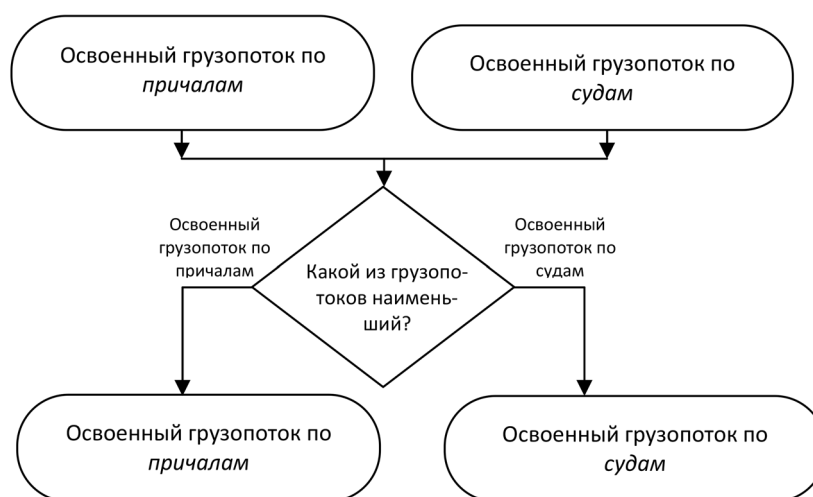


Рис. 5. Схема определения направлений развития

Установление адекватности модели с ограничениями

С учетом введенных в модель ограничений были проведены расчеты и рассмотрена динамика изменения структуры грузопотоков по специализированным причалам на основе пяти выбранных грузопотоков (генеральный груз, укрупненные единицы, контейнеры, наливной и навалочный).

Ограничение по судам

На графике (рис. 6) отражено развитие порта при выполнении условия наличия только одного судна для каждого грузопотока. График развития грузопотоков показывают, что со временем достигается предельный уровень, после которого порт перестает принимать данный грузопоток, т. е. достигается максимальное значение грузопотока, которое может обработать порт при ограниченном количестве судов. Ограничение по всем видам грузов достигается довольно быстро, так как величина пропускной способности, связанная с наличием флота, в данном случае невелика и зависит от вместимости судна и времени рейса. Первым достигается предел у генерального груза — самое маленькое судно и самое долгое время рейса. Позже всего достигается предел у навалочных и наливных грузов — самое большое судно и относительно небольшое время рейса, связанное со сравнительно быстрой погрузкой и выгрузкой данного типа судов.

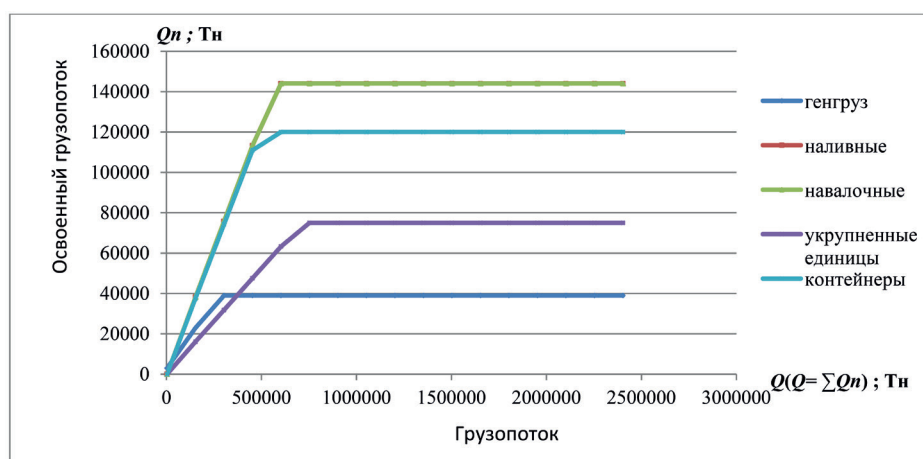


Рис. 6. График развития порта при ограничении наличия судов

На основе полученных данных представлено визуальное развитие порта во времени под влиянием грузопотока и введенных ограничений. Высота прямоугольника схематично отображает размер определенного, принятого портом грузопотока (рис. 7).

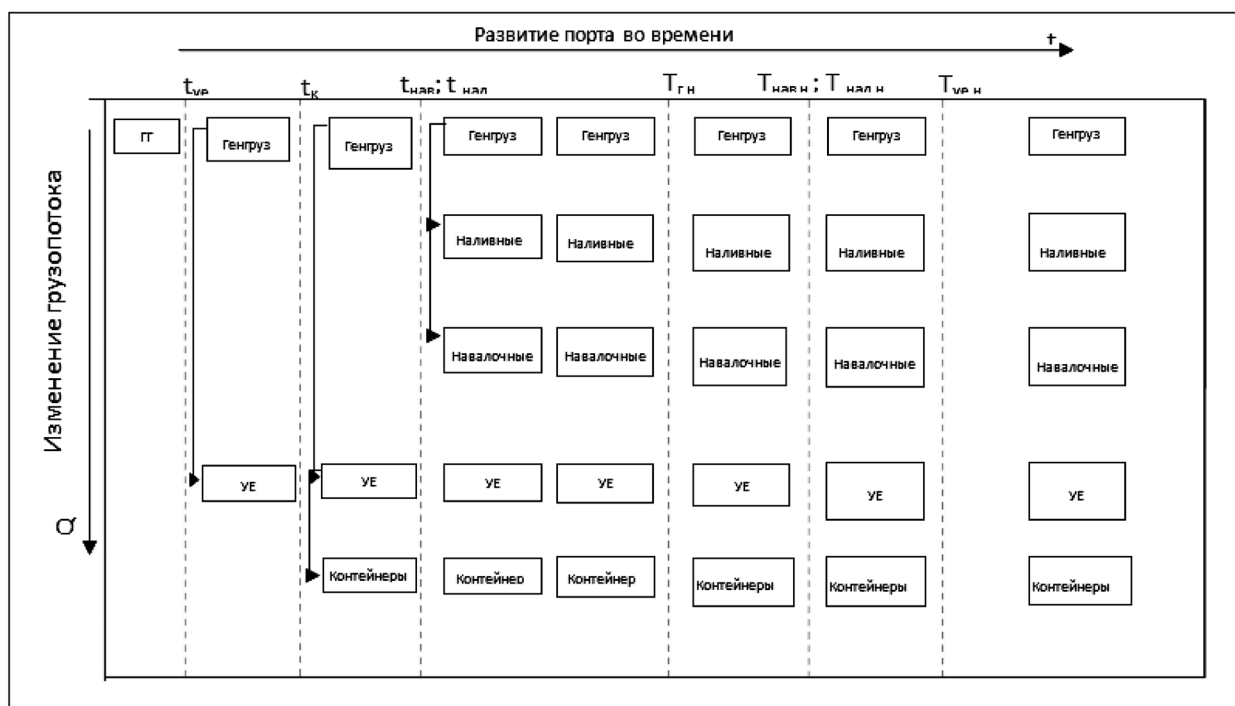


Рис. 7. Схема развития порта при ограничении наличия судов

Для проведения расчетов были выбраны два варианта воздействия ограничений — наличия судов и наличия или возможности создания причалов.

Ограничение по причалам

При увеличении количества судов каждого типа происходит увеличение пропускной способности системы «причал — судно» до нового ограничения, которым в данном случае становится пропускная способность причала. Заполнение причалов с ростом грузопотока происходит медленнее, о чем и свидетельствует график (рис. 8). В соответствии с пропускной способностью насыщение причалов происходит в том же порядке.

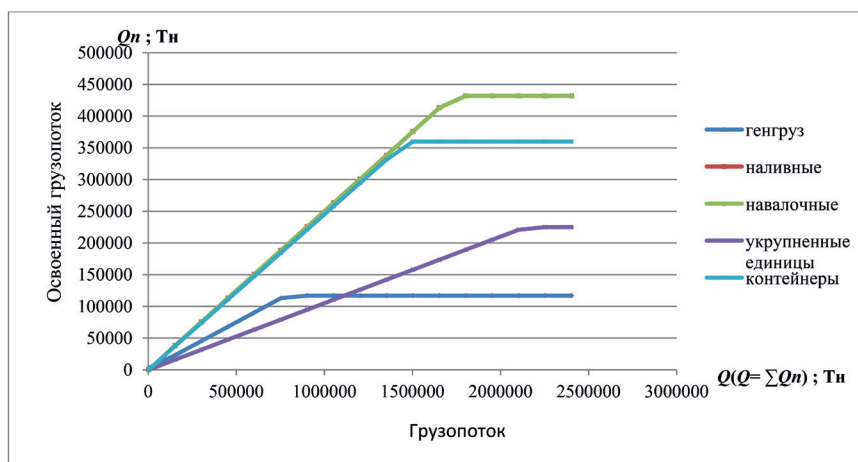


Рис. 8. График развития порта при ограничении наличия причалов

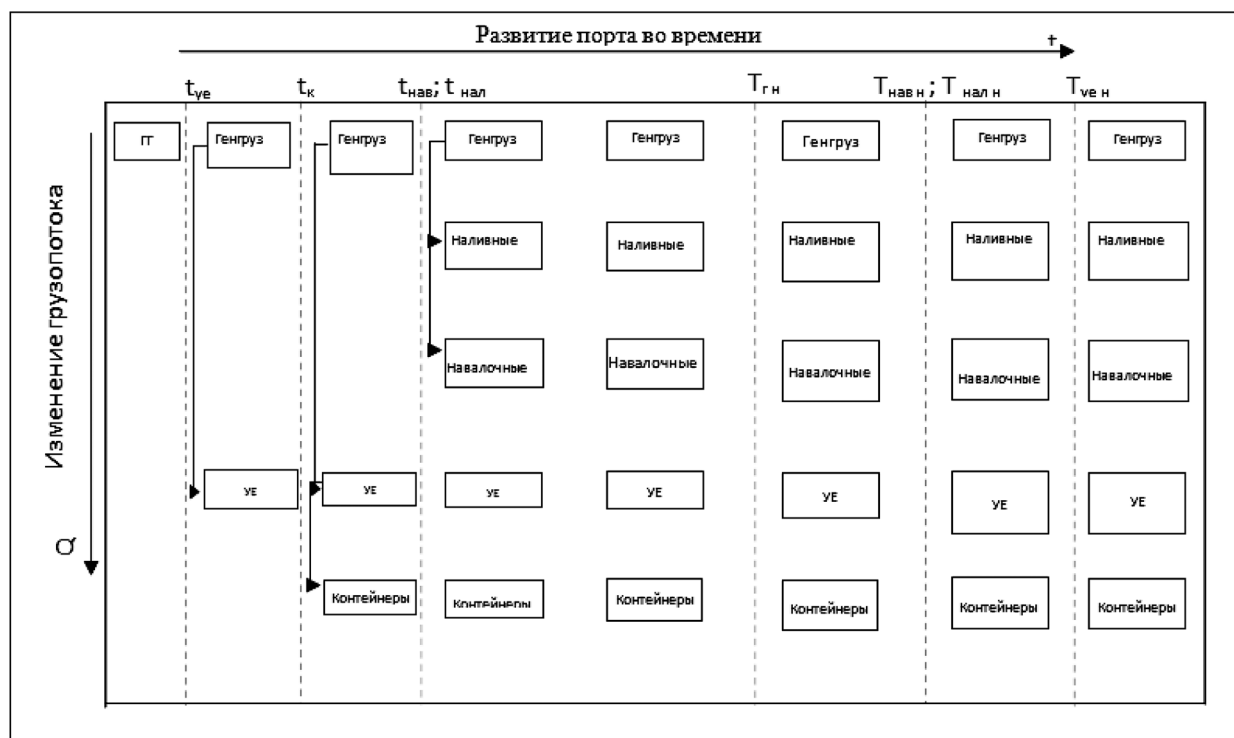


Рис. 9. Схема развития порта при ограничении наличия причалов

Полученные результаты показали, что динамика обработки специализированного груза в порту при ограниченных ресурсах имеет понятную особенность: достигая предельного уровня возможности перегрузки, порт перестает принимать излишний грузопоток. Непринятый портом грузопоток, в свою очередь, либо переходит в другой порт побережья, либо происходит дальнейшее развитие

инфраструктуры данного порта / флота для аккомодации дополнительного объема груза (рис. 2). Таким образом, подтверждается адекватность работы модели при введении в нее ограничений.

Выводы

Представленная в первоначальном варианте количественная модель работает в идеальных условиях, которые характеризуются неограниченными ресурсами — любым потребным количеством причалов для обработки различных типов грузов и наличием неограниченного специализированного флота, способного перевезти любое количество груза, что не соответствует существующим жизненным реалиям. На самом деле порты развиваются в условиях ограниченных ресурсов.

В процессе работы над моделью были выявлены основные ограничения и разработан алгоритм их введения в существующую количественную модель развития порта — это доступный рынок судов и наличие или возможность создания специализированных причалов для перевалки грузов, а так же алгоритм, предусматривающий их совместное влияние на порт. Проведенные эксперименты с измененной моделью доказали ее работоспособность и адекватность.

Таким образом, доработанная модель учитывает влияние существующих ограничений на развитие порта, а также взаимное влияние ограничений друг на друга и совместное воздействие на развитие порта в освоении меняющегося грузопотока, что делает ее достаточным инструментом для практических специалистов в определении направления развития порта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин А. В. Обобщенная имитационная модель процесса развития портов / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 43–51.
2. Port development. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.
3. Bird J. Seaports and Seaport Terminals / J. Bird. — London: Hutchinson University Library, 1980. — 117 p.
4. Beresford A. K. C. The UNCTAD and WORKPORT models of port development: evolution or revolution? / A. K. C. Beresford, B. M. Gardner, S. J. Pettit, A. Naniopoulos, C. F. Wooldridge // Maritime Policy & Management. — 2004. — Vol. 31. — N. 2. — Pp. 93–107.
5. Pesquera M. A. Sustainable development strategies for cities and ports: monographs / M. A. Pesquera, J. R. Ruiz. — United Nation, Geneva: UNCTAD, 1996. — 125 p.
6. Кузнецов А. Л. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 141–153.
7. Кириченко А. В. Взаимоотношения города и порта: эволюция и перспективы / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — № 1 (50). — С. 12–15.
8. Кириченко А. В. Анализ моделей терминальной перевозки грузов в транспортной логистике / А. В. Кириченко // Логистика: современные тенденции развития: Материалы XIV Международной науч.-практ. конференции. — СПб., 2015. — С. 183–187.
9. Кузнецов А. Л. Базовая модель логистических потоков через контейнерный терминал / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2. — С. 18–20.
10. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование как инструмент проектирования морских и наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, В. А. Блудкина // Тезисы докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2008. — С. 237–240.

THE RESTRICTIONS EFFECT ON A GENERALIZED IMITATION MODEL OF THE DEVELOPMENT PROCESS OF PORTS

The analysis of a port development imitational model designed by author was done. It is revealed that the model works in an ideal environment characterized by unrestricted resources available for growth of the port.

Key potential constraints affecting the development of the port were identified, examined their individual and joint impacts on the system. The necessity of making changes in the generated model to account for the influence of the identified limitations was done. There were developed and proved the algorithms used in the imitational model, which taking into account the impacts of the identified constraints. The tests of the model in different types of exposure limits were fulfilled. It was determined the adequacy of the model in a new environment. It is shown that the model proposed in the paperwork is a mathematical one that takes into account the influence of certain external forces. Model is able not only to explain existing condition of the port, the causes that led up to it, and to give a certain prediction of the development in the future, but to do it in real conditions under the influence of certain external forces, which is the most valuable for practical application.

Keywords: port, terminal, imitation model, logistics.

REFERENCES

1. Galin A.V. "Generalized imitation model of ports development process." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 6(34) (2015): 43–51.
2. *Port development*. New York: UNCTAD, 1985.
3. Bird, J. *Seaports and Seaport Terminals*. London: Hutchinson University Library, 1980.
4. Beresford, A. K. C., B. M. Gardner, S. J. Pettit, A. Naniopoulos, and C. F. Wooldridge. "The UNCTAD and WORKPORT models of port development: evolution or revolution?" *Maritime Policy & Management* 31.2 (2004): 93–107.
5. Pesquera, M. A., and J. R. Ruiz. *Sustainable development strategies for cities and ports: Monographs*. United Nation, Geneva: UNCTAD, 1996.
6. Kuznetsov, A. L., and A. V. Galin. "The genesis of port development models in modern transportation science." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2(30) (2015): 141–153.
7. Kirichenko, A. V., and A. L. Kuznetsov. "Interrelations between cities and ports: evolution and perspectives." *Transport of the Russian Federation* 1(50) (2014): 12–15.
8. Kirichenko, A. V. "Analiz modelej terminal'noj perevozki грузов v transportnoj logistike." *Materialy XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. SPb., 2015: 183–187.
9. Kuznetsov, A. L., and E. Yu Kozlova. "Basic model of logistical flows through container terminal." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2 (2008): 18–20.
10. Kuznetsov, A. L., and V. A. Bludkina. "Imitacionnoe modelirovanie kak instrument proektirovanija morskikh i nazemnykh kontejnernykh terminalov." *Tezisy dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i kursantov*. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O. Makarova, 2008: 237–240.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Галин Александр Валентинович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
Galin2403@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Galin Aleksandr Valentinovic —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
Galin2403@gmail.com

Статья поступила в редакцию 05 декабря 2015 г.

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КРИТЕРИЕВ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРОМАХОВ В ИЗМЕРЕНИЯХ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрено понятие «промах в измерениях навигационных параметров» в контексте современных условиях судовождения. Показано, что эти условия оставляют вахтенному помощнику капитана минимум времени для оценки адекватности измерений и выявления промаха, при том, что культура измерений, которая среди прочего лежит в основе безопасности плавания, не позволяет судоводителю игнорировать проверку результатов измерений на промах. Проведен краткий анализ соотношения двух способов выявления и исключения промахов: принятого в практике судовождения интуитивного цензурирования и способа, основанного на использовании специальных статистических критериев. Обоснована методика, позволяющая для любого критерия выявления промахов оценить одну из его статистических характеристик — мощность, и, сравнив критерии по этой характеристике, выбрать оптимальный. Представлены результаты применения обоснованной методики в отношении двух критериев, рекомендуемых для использования в судовождении: критерия трех сигм и критерия размаха. Методика предназначена для использования при построении различных автоматизированных систем, алгоритмы которых включают процедуру статистической обработки измерений, а также для ручной обработки измерений.

Ключевые слова: измерения, навигационные параметры, промах, критерии, мощность.

Введение

Основным критерием оптимальности судовождения, как и мореплавания в целом, является безопасность, которая обеспечивается среди прочего точностью различных измерений навигационных параметров, проводимых с целью решения задач судовождения. Крайне негативное влияние на точность измерений оказывают промахи [1], более того, принятие судоводителем решения на основе результатов измерений, являющихся промахами, может привести к катастрофическим последствиям, вплоть до аварии и гибели людей и судна.

Под промахом подразумевается измерение, результат которого для данных условий резко отличается от остальных результатов измерений этого ряда и с большой долей вероятности не принадлежит этому ряду, а также сам результат такого измерения, содержащий грубую погрешность [2]. Между тем, морская судоходная отрасль XXI в. — это постоянно растущие общий тоннаж флота, скорость и размеры судов, и, следовательно, плотность и интенсивность их движения в наиболее «популярных» акваториях Мирового океана, а также прогрессирующая автоматизация большинства технологических процессов, в том числе связанных с судовождением. При этом последняя инициировала тенденцию к сокращению численности экипажей судов, и, в частности, штурманской службы. Однако, значительно уменьшив долю ручного труда, используемый на судах комплекс различных автоматических и автоматизированных систем кроме функции контроля за их работой, возложил на судоводителя объемную функцию анализа огромного потока информации, непрерывно поступающей из множества источников.

В контексте подобных жестких условий современное судовождение, для которого характерны насыщенная, постоянная меняющаяся и подлежащая постоянному контролю навигационная ситуация, практически не оставляет судоводителю времени для осуществления объемной серии измерений или относительно продолжительного наблюдения за показаниями технического средства. В таком, порой запредельном для восприятия человеком, информационном потоке вахтенный помощник нередко ограничивается необходимым минимумом, т. е. одним измерением, и на его основе принимает решение. Подобный оперативный и псевдорациональный подход не дает возможности оценить адекватность результата измерения. Вместе с тем, например, взглянув на доли секунды на индикатор эхолота в момент скачка напряжения, судоводитель может принять за истину глубину, значительно отличающуюся от реальной и возможно небезопасной.

Априорно предотвратить появление промахов в процессе измерений навигационных параметров можно четкой организацией измерений, качественной подготовкой наблюдателей, настройкой, проверкой и тестированием технических средств и судовой системы электроснабжения, применением принципов и правил эргономики при разработке технических средств измерений. Однако все эти мероприятия даже в совокупности не дают 100 %-й гарантии отсутствия промахов. Даже тщательно подготовленные наблюдения и измерения могут дать неоднородные данные, хотя бы в силу возможной неконтролируемой изменчивости условий наблюдений.

Таким образом, основной подготовительной задачей статистической обработки измерений навигационного параметра является выявление и исключение промахов из серии измерений.

Обоснование актуальности методики

Для проверки измерений на промах разработаны специальные статистические критерии (статистики) [3] – [5], из множества которых в судовождении, как правило, рекомендуется к использованию два: критерий «трех сигм» и критерий размаха (критерий Диксона, Q -критерий, Q -статистика) [6]. Если критерий опровергает нулевую гипотезу о том, что «подозрительный» результат незначительно отличается от остальных (не является промахом), то наблюдатель должен исключить промах из выборки (из ряда измерений). Однако возможно, что причина отклонения состоит в появлении нового физического процесса. Тогда статистическое установление значимости промаха должно привлечь внимание наблюдателя к этому процессу.

Принятое в практике судовождения интуитивное цензурирование результатов измерений основано на знании судоводителем текущих условий плавания и их динамики и на использовании следующего принципа: *«такого результата измерений не может быть, так как его не может быть при настоящих условиях плавания»*. Однако интуитивное цензурирование, ни в коей мере, не отменяет самого института статистических критериев выявления промахов. Так, оптимальное с точки зрения самоконтроля построение автоматических и автоматизированных навигационных систем должно предусматривать в своем алгоритме один или несколько критериев, а любое техническое и методологическое новшество судовождения должно пройти процедуру испытаний и апробирования, сопровождающуюся проведением измерений и обработкой их результатов, включающую проверки на промах.

Природа навигационных измерений такова, что судоводитель не может знать ни саму генеральную совокупность, ни ее характеристики, однако генеральная совокупность существует, хотя и носит некоторый виртуальный характер. Действительно, пусть судоводитель измеряет при помощи оптического пеленгатора пеленг, осуществляя серию наблюдений. Каков бы ни был объем этой серии, последняя все равно является выборкой по отношению к той самой виртуальной генеральной совокупности, объем которой стремится к бесконечности (здесь можно даже применить некорректное сочетание «равен бесконечности»). То же самое можно отнести и к измерениям, которые осуществляются (обрабатываются) различными автоматизированными навигационными системами.

По-другому обстоит дело, например, при проверке качества какой-либо выпускаемой на заводе детали, когда из известной генеральной совокупности в тысячу единиц делают выборку из десяти деталей. Поэтому судоводитель, исследователь или автоматическая система никак не могут оценить реальное распределение генеральной совокупности, принимая для определенности и на основании предельной теоремы Ляпунова, что случайные погрешности результатов навигационных измерений (а, значит, и непосредственно результаты) распределены нормально. Иными словами, при исследовании случайных погрешностей различных навигационных параметров априори принимается нормальное распределение [7], [8] генеральной совокупности как самих погрешностей, так и результатов измерений.

Однако распределение результатов измерений, составляющих серию (распределение выборки), в общем случае отлично от нормального. Это имеет место, в первую очередь, из-за малого

объема серии, а не из-за ошибочности предположения о нормальном распределении генеральной совокупности и бесконечного объема последней. Действительно, никакой судоводитель не будет измерять подряд десятки (а автоматизированная система — сотни и тысячи) отсчетов навигационного параметра. В лучшем случае он ограничится выполнением трех – пяти отсчетов (а в редких случаях немного большим их количеством). При этом точечные оценки характеристик генеральной совокупности (математического ожидания и дисперсии), вычисленные по серии (выборке) малого объема, будут, определенным образом, отличаться (иметь сдвиг) относительно самих характеристик. Очевидно, что это различие будет уменьшаться при увеличении объема выборки, что в практике судовождения осуществить невозможно.

Вместе с тем обоснование критериев выявления промахов приводится в предположении строго нормального распределения случайных величин (результатов измерений или их погрешностей). Исходя из этого предположения, определяются и соотношения критических значений статистик и функций мощности (уровня значимости, доверительной вероятности и непосредственно мощности). Таким образом, функции мощности, численные значения которых задаются при использовании критериев, имеют теоретический характер. Кроме того, алгоритмы использования критериев, как правило, включают в себя только уровень значимости или доверительную вероятность (т. е. вероятность совершения или не совершения ошибки первого рода), при этом игнорируются численные значения вероятности совершения ошибки второго рода (или, точнее, обратная вероятность, т. е. непосредственно мощность критерия). Однако достаточно очевидно, что отвергнуть правильную гипотезу, т. е. признать промахом измерение, которое таковым не является, и при этом совершить ошибку первого рода менее опасно, чем принять ошибочную нулевую гипотезу, т. е. «пропустить» промах в серию измерений.

Таким образом, большое значение в числе прочего для выбора критерия выявления промаха в серии измерений конкретного объема имеют результаты эмпирической оценки мощности различных критериев на разных уровнях теоретической доверительной вероятности применительно к выборкам различного, но относительно малого, объема. Тем более, что исследование и оценка мощности различных статистических критериев являются неотъемлемым условием развития прикладных математических методов [9], [10].

Описание методики

Приведем поэтапное описание методики, предлагаемой для эмпирической оценки мощности критериев выявления промахов, и некоторые результаты применения этой методики в отношении критерия «трех сигм» и критерия Диксона для двух доверительных вероятностей: 0,95 и 0,995. В основу методики положено моделирование измерений при игнорировании экспериментальных данных. Подобный подход объясняется той же гипотезой о нормальном распределении генеральной совокупности случайных погрешностей результатов навигационных измерений, а, точнее, предназначением критериев для работы именно с нормально распределенными совокупностями. Действительно, если в основу методики положить большую совокупность экспериментальных данных, распределение которой, в общем случае, будет отличаться от строго нормального, то по отношению к этой совокупности и выборкам, из нее осуществленным, практически невозможно определить «эталон», по сравнению с которым и будет приниматься решение о том, правильно ли «отработал» критерий или нет. Кроме того, моделирование измерений является традиционным методом для подобного рода исследований, который применялся, например, Диксоном.

Оценка мощности проводится для выборок различного объема (в приведенных далее вычислениях используются выборки из 5, 10, 15 и 25 измерений) и различных доверительных вероятностей (если такое различие предусмотрено критерием). На первом этапе формируется (моделируется) генеральная совокупность большого объема (много больше объема выборок), эле-

менты которой распределены строго по нормальному закону (т. е. закон распределения можно считать нормальным с доверительной вероятностью, равной единице). Например, на рис. 1 приведена гистограмма такого распределения с математическим ожиданием $a = 5$ и стандартом $\sigma = 1$. Для удобства будем считать, что рассматриваемой дискретной случайной нормально распределенной величиной является пеленг ориентира.

Согласно правилу «трех сигм», все значения случайной нормально распределенной величины заключены в пределах $(a - 3\sigma; a + 3\sigma)$ с вероятностью 99,7 % (т. е. практически достоверно). Действительно, в генеральной совокупности, приведенной на рис. 1, только два значения из тысячи выходят за эти пределы. Здесь необходимо указать на различие в правиле и критерии «трех сигм». Правило задает пределы, в которых находится случайная величина по математическому ожиданию и стандарту, т. е. по характеристикам генеральной совокупности. В случае критерия «трех сигм» принимается во внимание интервал $(\bar{x} - 3\sigma_{\text{выб}}; \bar{x} + 3\sigma_{\text{выб}})$, полученный по результатам статистической обработки выборки (серии измерений навигационного параметра) ограниченного объема. При этом, если измеренное значение навигационного параметра выходит за пределы $(a - 3\sigma; a + 3\sigma)$, то с вероятностью 99,7 % можно считать, что оно является промахом. Аналогичный вывод в отношении вероятности делать нельзя, если результат измерения выходит за пределы интервала $(\bar{x} - 3\sigma_{\text{выб}}; \bar{x} + 3\sigma_{\text{выб}})$. Это, в первую очередь связано с тем, что точечные оценки $\bar{x}$ и $\sigma_{\text{выб}}$ характеристик a и σ генеральной совокупности это далеко не одно и то же, что и сами характеристики (особенно при выборках малого объема).

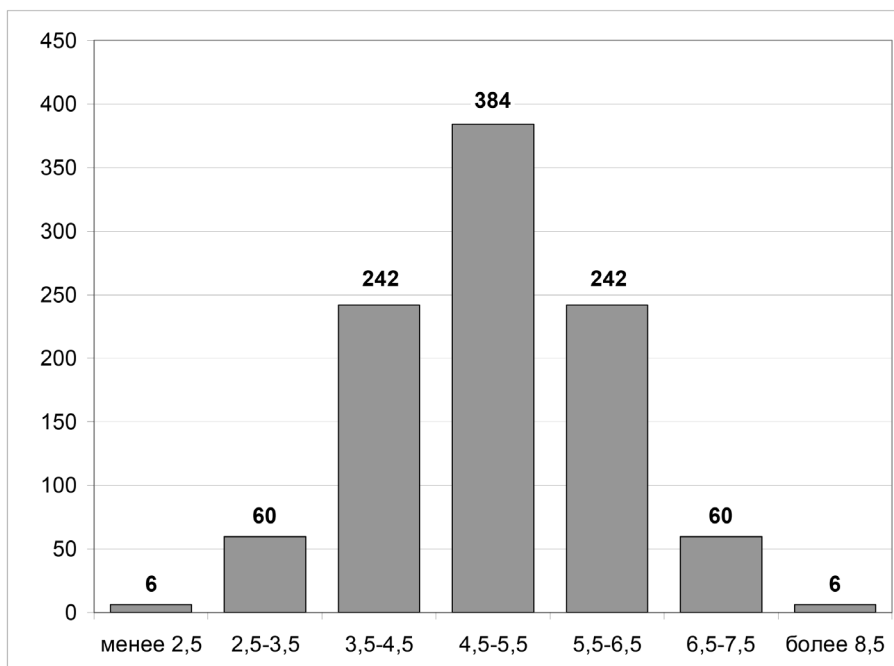


Рис. 1. Гистограмма генеральной совокупности

Второй этап методики предполагает извлечение из генеральной совокупности некоторого количества выборок заданного заранее объема. Извлечение происходит случайным образом. Количество выборок должно быть таковым, чтобы обеспечить достаточную точность результатов дальнейших вычислений. В приведенных расчетах использовалось по пятьдесят выборочных совокупностей для каждого исследуемого объема выборки. Очевидно, что каждая серия измерений будет свободна от промахов. Далее алгоритм предусматривает постепенное увеличение максимального значения каждой выборки (т. е. образуются новые выборки). При этом каждый раз максимальное значение проверяется на промах различными критериями при различных доверитель-

ных вероятностях (уровнях значимости). Для удобства обобщения и анализа результатов проверки на промах используем нормированное отклонение $h = (x_{\max} - a) / \sigma$. Таким образом, значения $x_{\max}$ будут являться промахами, если для них $h \geq 3$.

Условие $h \geq 3$ является граничным для единичной проверки мощности критерия выявления промаха. Если при $h \geq 3$ критерий обнаружил промах или при $h < 3$ его не обнаружил, то единичная проверка прошла успешно. Здесь необходимо заметить, что необнаружение критерием промаха при $h \geq 3$ является ошибкой второго рода, а количество успешных единичных проверок будет характеризовать непосредственно мощность критерия в статистическом смысле. Соответственно случай обнаружения критерием промаха при $h < 3$ является ошибкой первого рода, а количество успешных единичных проверок будет эмпирической оценкой доверительной вероятности. Как отмечалось ранее, мощность и доверительную вероятность можно обобщить одним термином — *функции мощности*. Вместе с тем Диксон в подобном случае употреблял термин *производительность* (*performance*). Однако для удобства изложения материала в настоящей статье будем использовать единый термин — *мощность*.

Так как отстояние максимального значения исходной выборки от значения случайной величины, соответствующей $h = 3$, и правой границы интервала $(a - 3\sigma; a + 3\sigma)$ небольшое, то при $h < 3$ максимальное значение выборки необходимо увеличивать с небольшим шагом, чтобы для построения адекватной линии тренда получить несколько значений h . При $h \geq 3$ этот шаг можно увеличить. Приведем пример. Из генеральной совокупности, приведенной на рис. 1, сделаем выборку объемом $n = 5$: 4,70; 5,06; 5,75; 6,00; 6,53, а затем выполним следующие действия:

- увеличим максимальное значение этой выборки до семи ($h = (7 - 5) / 1 = 2$) и исследуем это значение на промах поочередно каждым из исследуемых критериев на различных уровнях значимости;
- проведем такую же проверку на промах максимальных значений 7,2; 7,4; 7,6; 7,8, т. е. при нормированных отклонениях, равных 2,2; 2,4; 2,6; 2,8;
- для максимальных значений, равных восьми и более, т. е. при $h \geq 3$, шаг изменения можно увеличить до 0,5.

На третьем этапе применения методики для каждого значения нормированного отклонения h , каждого критерия и уровня значимости подсчитывается общее количество $N_{\text{кри}}(h, \alpha)$ единичных проверок и количество $S_{\text{кри}}(h, \alpha)$ удачных единичных проверок. Тогда частное

$$E_{\text{кри}}(h, \alpha) = \frac{S_{\text{кри}}(h, \alpha)}{N_{\text{кри}}(h, \alpha)}$$

будет являться показателем эффективности (мощностью) критерия на уровне значимости α при нормированном отклонении h .

Подсчитав по каждому критерию и уровню значимости значения $E_{\text{кри}}(h, \alpha)$ для различных значений нормированного отклонения, необходимо построить графики зависимости $E_{\text{кри}}^{\alpha}(h)$. Априорно можно утверждать, что для кривых $E_{\text{кри}}^{\alpha}(h)$ точка $h = 3$ будет являться точкой разрыва.

Приведенный алгоритм последовательно применяется к выборкам различного объема. После того как расчеты по всем объемам выборок будут выполнены, а графики — построены, есть смысл в построении кривых, определяющих зависимость $E_{\text{кри}}^{\alpha}(n)$ для нескольких различных значений нормированного отклонения, близких справа и слева к $h = 3$. При построении графиков с конечными значениями мощности критериев целесообразно выполнить два графика, один из них будет содержать значения при $h \geq 3$, а другой при $h < 3$.

В таблице (с. 21) отображены результаты применения методики в отношении указанных критериев, которые содержат значения мощности в зависимости от значения нормированного

отклонения и объема выборки. В качестве примера графического отображения результатов применения методики на рис. 2 приведена зависимость мощности критериев от величины нормированного отклонения для объема выборки, равной 25 (для $h \geq 3$), а на рис. 3 — зависимость мощности критериев от объема выборки (для $h = 3,2$). Для получения точки, максимально приближенной слева к граничному значению h , априорно принято, что $h = 3$ при необходимости трактуется как $h = 2,99$.

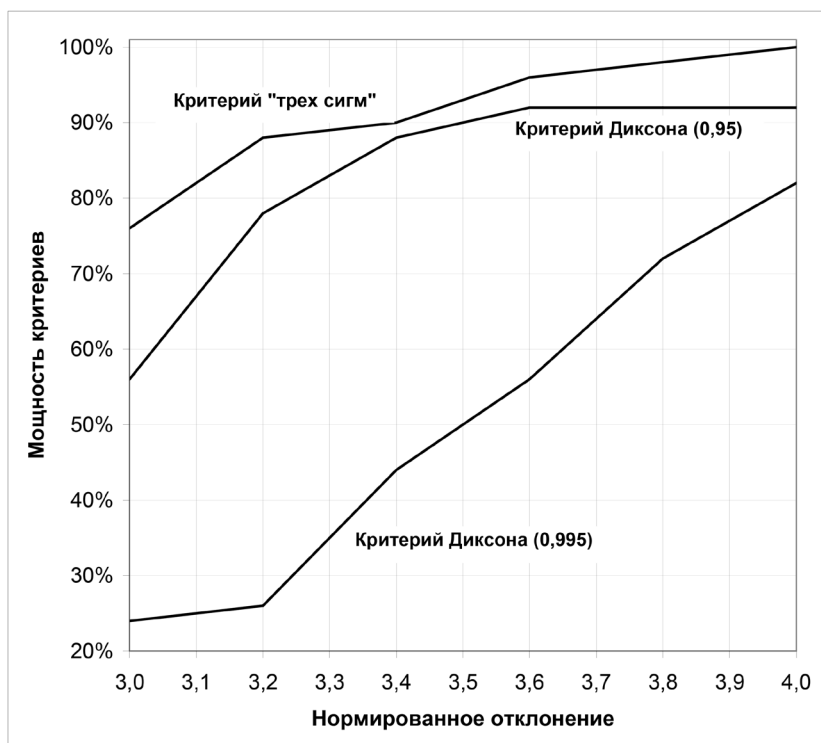


Рис. 2. Зависимость мощности критериев от величины нормированного отклонения

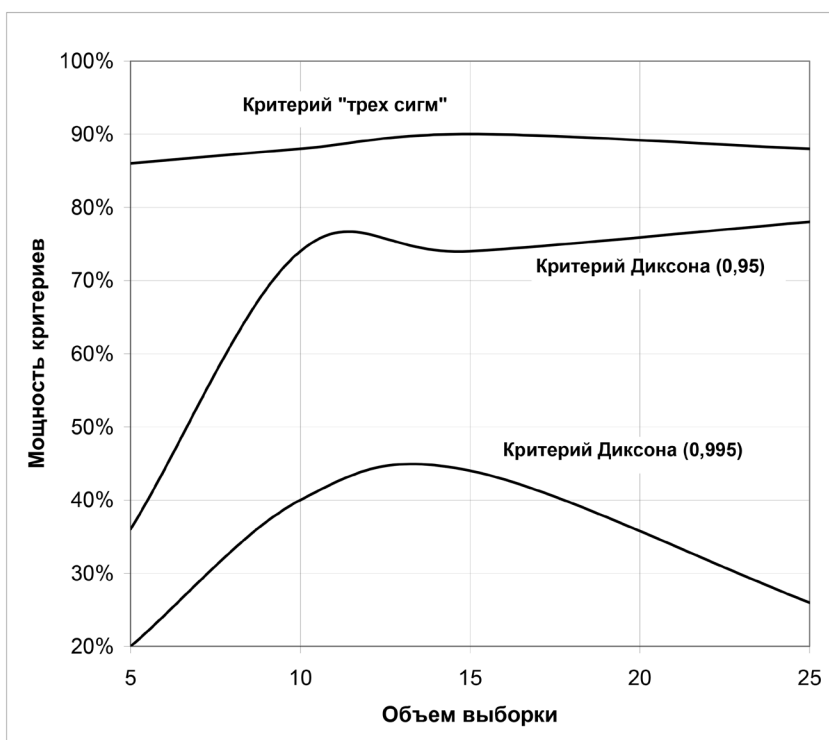


Рис. 3. Зависимость мощности критериев от объема выборки

**Мощности критериев для серий измерений различного объема
и разных значений нормированного отклонения**

Критерии различной доверительной вероятности	Объем выборки (количество измерений в серии) $n = 5$												
	Нормированное отклонение h												
	2,5	2,8	2,99	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0
	Значения мощности в процентах												
Критерий «трех сигм»	38	28	18	82	86	86	92	98	98	98	100	100	100
Критерий Диксона, 0,995	90	88	10	20	20	26	30	30	30	34	44	58	76
Критерий Диксона, 0,950	74	70	68	32	36	40	44	50	52	72	78	90	100
	Объем выборки (количество измерений в серии) $n = 10$												
	Нормированное отклонение h												
	2,5	2,8	2,99	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0
	Значения мощности в процентах												
Критерий «трех сигм»	40	20	16	84	88	92	98	98	100	100	100	100	100
Критерий Диксона, 0,995	90	84	74	26	40	42	52	54	64	74	84	98	100
Критерий Диксона, 0,950	58	40	32	68	74	78	86	90	96	98	100	100	100
	Объем выборки (количество измерений в серии) $n = 15$												
	Нормированное отклонение h												
	2,5	2,8	2,99	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0
	Значения мощности в процентах												
Критерий «трех сигм»	42	24	18	82	90	90	92	100	100	100	100	100	100
Критерий Диксона, 0,995	82	70	64	36	44	50	58	66	72	82	94	98	100
Критерий Диксона, 0,950	56	38	34	66	74	82	86	94	94	98	100	100	100
	Объем выборки (количество измерений в серии) $n = 25$												
	Нормированное отклонение h												
	2,5	2,8	2,99	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0
	Значения мощности в процентах												
Критерий «трех сигм»	70	36	24	76	88	90	96	98	100	100	100	100	100
Критерий Диксона, 0,995	92	80	76	24	26	44	56	72	82	92	94	98	100
Критерий Диксона, 0,950	76	54	44	56	78	88	92	92	92	96	98	100	100

Представленные графически результаты оценки мощности критериев самодостаточны. Это означает, что любой специалист, занимающийся статистической обработкой навигационной информации, может, опираясь на представленные графики, учитывая специфику алгоритма применения каждого критерия и свойства обрабатываемой навигационной информации, решить для себя самостоятельно, какой критерий выявления промаха использовать. Иными словами, анализ построенных в результате применения описанной методики графиков позволит сделать вывод о том, какой из критериев выявления промахов в навигационных измерениях для определенного сочетания (α ; n) будет наиболее оптимальным и в совокупности с анализом затрачиваемых на выявление промахов ресурсов наиболее эффективным.

Выводы

Представленная методика может быть использована в случае, если генеральная совокупность распределена по закону, отличному от нормального закона распределения, и для соответствующих этому распределению критериев.

Основное предназначение данной методики — выбор оптимальных критериев выявления промахов при построении различных автоматических и автоматизированных навигационных си-

стем с целью дальнейшей их интеграции в алгоритмы этих систем. Очевидно, что методика не предназначена для применения судоводителями в их непосредственной ежедневной практической деятельности, но может быть основой для рекомендаций по статистической обработке навигационных измерений или иных данных, полученных в научных целях. Для выбора оптимального критерия и формулировки рекомендаций в некоторых случаях могут быть использованы и результаты применения методики, представленные ранее.

В любом случае, как начинающие свою карьеру, так и опытные судоводители, вне зависимости от реального объема знаний, умений и навыков, касающихся теории погрешностей, должны осознавать, что любые измерения, проводимые на борту судна, могут содержать промах, поэтому всегда следует критично относиться к любой цифре, вне зависимости от того, получена ли она при ручных измерениях навигационного параметра (пеленга, высоты светила и др.) или при помощи технических средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рябченко Р. Б.* Идентификация промахов, обеспечивающая безопасность плавания в стесненных водах / Р. Б. Рябченко, В. В. Шутов, В. И. Меньшиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3. — С. 38–40.
2. *Ермаков С. В.* Детализация понятия «промах в навигационных измерениях» / С. В. Ермаков // Инновационная наука. — 2015. — № 8–2 (8). — С. 33–38.
3. *Марков В. В.* Обзор способов повышения качества результатов многократных измерений при исключении промахов / В. В. Марков, О. Н. Борзенкова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2007. — № 3. — С. 104–106.
4. *Тарасов И. Е.* Автоматическая фильтрация промахов в информационно-измерительных системах на основе Байесовской статистики / И. Е. Тарасов // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2010. — Т. 15. — № 9. — С. 51–55.
5. *Колчев А. А.* Использование критерия обнаружения промахов при подавлении сосредоточенных по спектру помех / А. А. Колчев, А. О. Щирый // Обзорение прикладной и промышленной математики. — 2006. — Т. 13. — № 4. — С. 654–655.
6. *Кузнецов В. В.* Алгоритм обнаружения серии выбросов по критерию Диксона в инверсионной вольтамерометрии / В. В. Кузнецов, С. В. Романенко, С. Л. Ларин // Аналитика и контроль. — 2014. — Т. 18. — № 3. — С. 310–315.
7. *Камалян Р. З.* О нормальном распределении / Р. З. Камалян, С. Р. Камалян // Вестник ИМСИТ. — 2006. — № 1–2. — С. 9.
8. *Волкова С. Н.* Экономическо-математическое обоснование перехода действия закона нормального распределения в распределение Пуассона / С. Н. Волкова, Ю. И. Майоров, А. В. Шлеенко // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. — 2009. — Т. 3. — № 3. — С. 6–8.
9. *Лемешко Б. Ю.* Мощность критериев согласия при близких альтернативах / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов // Измерительная техника. — 2007. — № 2. — С. 23–29.
10. *Филоненко П. А.* Исследование влияния закона распределения моментов цензурирования и степени цензурирования на мощность критериев однородности / П. А. Филоненко, С. Н. Постовалов // Сибирский журнал индустриальной математики. — 2014. — Т. XVII. — № 3. — С. 122–134.

METHOD OF COMPARATIVE ANALYSIS OF CRITERIA FOR THE IDENTIFICATION OUTLIER IN THE MEASUREMENTS NAVIGATION PARAMETERS

The concept of “outlier in the measurement of navigation parameters” in the context of modern conditions of navigation was considered. It is shown that these conditions leave for watch officer the minimum of time to assess the adequacy of measurement and detection outlier, though, that the culture of measurement, which

among other things is the basis of the safety of navigation, not allowing the navigator to ignore the outlier test of measurements results. The brief analysis of the ratio of two ways to identify and eliminate outliers: intuitive censoring adopted in the navigation practice and technique based on the use of specific statistical tests. It is founded the method, which allows for any criterion of outlier detection to assess of its statistical characteristics — power and choose the best criterion comparing the criteria of their power. It is presented the results of application founded method in regard to two criteria are recommended for use in navigation — three sigma criterion and the criterion of scale. The method is intended for use in the construction of a variety of automated systems, algorithms which include statistical processing of the measurement procedure and for manual measurement processing.

Keywords: measurements, navigation parameters, outlier, criteria, power.

REFERENCES

1. Ryabchenko, R. B., V. V. Shutov, and V. I. Menshikov. "Identification of near misses providing safety of the navigation in congested waters." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2010): 38–40.
2. Ermakov, S. V. "Detalizacija ponjatija "promah v navigacionnyh izmerenijah"." *Innovacionnaja nauka* 8–2(8) (2015): 33–38.
3. Markov, V. V., and O. N. Borzenkova. "The survey of the methods of raised the quality of the results of frequent measuring by the excluded the blunders." *Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii* 3 (2007): 104–106.
4. Tarasov, I. E. "Authomatic impulse noises filtration for measurement systems based on the Bayesian statistics." *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* 15.9 (2010): 51–55.
5. Kolchev, A. A., and A. O. Shhiryj. "Ispolzovanie kriterija obnaruzhenija promahov pri podavlenii sosredotochennyh po spektru pomeh." *Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj matematiki* 13.4 (2006): 654–655.
6. Kuznetsov, V. V., S. V. Romanenko, and S. L. Larin. "Detection algorithm of a series of releases by Dixon criterion in inversion voltammetry." *Analitika i kontrol* 18.3 (2014): 310–315.
7. Kamalyan, R. Z., and V. R. Kamalyan. "The normal distribution." *Vestnik IMSIT* 1–2 (2006): 9.
8. Volkova, S. N., Ju. I. Majorov, and A. V. Shleenko. "Jekonomicheskoe-matematicheskoe obosnovanie perehoda dejstvija zakona normalnogo raspredelenija v raspredelenie Puassona." *Vestnik of Kursk State Agricultural Academy* 3.3 (2009): 6–8.
9. Lemeshko, B.Y., S. B. Lemeshko, and S. N. Postovalov. "The power of goodness of fit tests for close alternatives." *Measurement Techniques* 50.2 (2007): 132–141.
10. Filonenko, P. A., and S. N. Postovalov. "Issledovanie vlijanija zakona raspredelenija momentov cenzurirovaniya i stepeni cenzurirovaniya na moshhnost' kriteriev odnorodnosti." *Journal of Applied and Industrial Mathematics* XVII.3 (2014): 122–134.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ермаков Сергей Владимирович —
старший преподаватель.
Балтийская государственная академия
рыбопромышленного флота
esv.klgd@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ermakov Sergey Vladimirovich —
Senior Lecturer.
BFFSA
esv.klgd@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 октября 2015 г.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЕРВОВАННЫХ КООРДИНАТ СУДНА ПРИ ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Рассмотрена эффективность обсервованных координат судна, рассчитанных при избыточных измерениях навигационных параметров методом наименьших квадратов в случае, когда закон распределения вероятностей погрешности исходной выборки отличается от нормального закона. Приведена математическая модель смешанного распределения погрешностей исходной выборки, состоящей из ряда серий наблюдений погрешностей измерения навигационного параметра, причем в серии наблюдений погрешности подчинены закону Гаусса, а их среднеквадратическое отклонение изменяется случайным образом от серии к серии. Получено аналитическое выражение для расчета оценки эффективности обсервованных координат, рассчитанных методом наименьших квадратов при наличии избыточных измерений навигационных параметров. Произведена оценка эффективности обсервованных координат судна в случае распределения погрешностей выборки по смешанному закону. Результаты расчета показали, что при изменении существенного параметра закона распределения от минимального значения до максимального эффективность изменяется почти вдвое.

Ключевые слова: погрешности навигационных измерений, распределение погрешностей исходной выборки, эффективность обсервованных координат судна.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ требуемого уровня точности контроля места судна является одной из актуальных проблем безопасного судовождения. Одним из способов достижения высокой точности обсерваций судна является использование избыточных измерений навигационных параметров с последующим расчетом координат судна методом наименьших квадратов. В случае, если погрешности измерений навигационных параметров отличаются от распределения Гаусса, то происходит потеря точности полученных координат судна, оценка которой определяется их эффективностью. Поэтому оценка эффективности обсервованных координат судна, в случае отличия закона распределения вероятностей погрешностей измерения навигационных параметров от нормального закона, является актуальной задачей, что и обусловило выбор тематики данной работы.

При определении закона распределения случайной погрешности ξ измерений заданного навигационного параметра h выполняются экспериментальные измерения навигационного параметра h и производится оценка значений погрешности ξ_i , которые накапливаются в выборку. Последняя представляет собой множество значений ξ_i погрешности, обозначенное $M(\xi_i)$.

Выборка значений погрешности ξ_i формируется при помощи значительного числа последовательных этапов наблюдения, которые выполняются в различных условиях. Поэтому выборка $M(\xi_i)$ состоит из подмножеств $m_j(\xi_i)$ значений погрешности ξ_i , причем дисперсии D_j каждого из подмножеств $m_j(\xi_i)$ в общем случае отличаются друг от друга. В дальнейшем, располагая выборкой $M(\xi_i)$, производится поиск закона распределения случайной погрешности ξ измерений навигационного параметра.

Зачастую принимается, что погрешности навигационных измерений распределены по нормальному закону, хотя в работах [1], [2] указывается, что погрешности навигационных измерений, полученные в натурных наблюдениях, не подчиняются нормальному закону распределения вероятностей, а в работах [1], [3], [4] предложены модели смешанного распределения погрешностей.

В работе [5] показано, что дифференциальные методы корректируют погрешности в определении местоположения по системе GPS, однако погрешности возрастают при увеличении расстояния навигационного приемника системы DGPS от базовой станции. В работе [6] выполнен анализ статистических материалов по точности определения места судна с помощью спутниковой радионавигационной системы, который показал, что предположение о распределении случайных

погрешностей определения широты и долготы по закону Гаусса не является корректным и требует альтернативного подхода.

При расчете обсервованных координаты судна аналитически по избыточным измерениям методом наименьших квадратов, или наименьшей квадратичной формы, с учетом предполагаемого нормального распределения погрешности ξ в то время, когда действительное распределение погрешностей исходной выборки $M(\xi_i)$ отличается от предполагаемого нормального распределения, происходит потеря точности обсервации.

Целью статьи является описание закона действительного распределения случайной погрешности исходной выборки $M(\xi_i)$ и оценка эффективности обсервованных координат судна, полученных при избыточных измерениях методом наименьших квадратов в случае, когда закон действительного распределения погрешности исходной выборки отличается от нормального закона. Таким образом, в данной работе следует рассмотреть ситуацию, когда предполагаемое распределение погрешности ξ является нормальным с дисперсией D_σ , которое и будет определять способ расчета обсервованных координат, а действительное распределение, полученное по исходной выборке, представляет собой смесь нормальных распределений с различными дисперсиями.

Предполагаемое распределение характеризуется плотностью $\varphi(\xi)$, которая имеет следующий вид:

$$\varphi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где $\sigma = \sqrt{D}$ — среднее квадратическое отклонение погрешности ξ .

Рассмотрим модель формирования исходной выборки $M(\xi_i)$, позволяющей получить плотность действительного распределения её погрешности. В этом случае примем следующие допущения.

1. Погрешности навигационных измерений в каждой серии измерений подмножества $m_j(\xi_i)$ имеют нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и неизменным средним квадратическим отклонением σ .

2. Выборка $M(\xi_i)$ содержит большое количество серий измерений с различными значениями σ , которое в выборке можно рассматривать как случайную величину, имеющую плотность распределения $\varphi(\sigma)$ и удовлетворяющую следующим условиям:

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} \varphi(\sigma) = 0; \quad \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \varphi(\sigma) = 0 \quad \text{и} \quad \sigma > 0.$$

В этом случае плотность смешанного распределения является плотностью распределения погрешностей навигационных измерений выборки и имеет вид

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{\varphi(\sigma)}{\sigma} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right) d\sigma. \quad (2)$$

Очевидно, что свойства плотности $\varphi(\sigma)$ определяют возможность получения плотности смешанного распределения $f(\xi)$ в явном виде и основные закономерности, присущие $f(\xi)$. Так, В. Т. Кондрашихин, используя модельные гипотезы, предложил в качестве $\varphi(\sigma)$ распределение Релея и логнормальное, а в работе [7], исходя из анализа статистических данных, предлагался выбор $\varphi(\sigma)$ в виде распределения Вейбулла. Однако только распределение Релея в качестве $\varphi(\sigma)$ позволяет получить плотность смешанного распределения $f(\xi)$ в явном виде. Это распределение Лапласа, которое не принадлежит к классу безгранично делимых распределений и не имеет непрерывной первой производной. В остальных случаях $f(\xi)$ не выражается в элементарных функциях.

Однако в работе [8] показано, что для плотности распределения $\varphi(\sigma)$, имеющей следующее выражение

$$f(\sigma) = \frac{2^{2n+1} n! \alpha^{2n-1/2}}{\sqrt{\pi} (2n)! \sigma^{2(n+1)}} e^{-\frac{\alpha}{\sigma^2}}, \quad (3)$$

существует плотность смешанного распределения $f(\xi)$ в явном виде.

Причем при $n = 0$ выражение (3) при подстановке в выражение (2) позволяет получить базовую плотность смешанного закона распределения вероятностей $f_b(x)$ (закона Коши), имеющую следующий вид [9]:

$$f_b(x) = \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)}.$$

Базовая плотность $f_b(x)$ при дифференцировании по параметру α обеспечивает формирование семейства плотностей смешанного распределения, которое можно использовать для описания плотности распределения случайных погрешностей исходной выборки, причем плотность $f_n(x)$ при $n > 0$ выражается следующим образом:

$$f_n(x) = \frac{2^n \alpha^{n+\frac{1}{2}} n!}{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2n-1) \sqrt{2\pi}} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)^{n+1}} \quad (n \leq 6). \quad (4)$$

Например, аналитические выражения плотности смешанного распределения $f_n(x)$ для существенных параметров $n = 2$ и $n = 6$ имеют следующий вид:

$$f_2(x) = \frac{8\alpha^{\frac{5}{2}}}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)^3};$$

$$f_6(x) = \frac{46080\alpha^{\frac{13}{2}}}{10395\sqrt{2\pi}} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)^7}.$$

Допустим, что действительная плотность распределения $f(x)$ погрешности исходной выборки определяется выражением (4), а расчет обсервованных координат судна выполняется методом наименьших квадратов исходя из условия нормального закона распределения вероятности погрешностей измерений.

Найдем для этого случая эффективность оценки обсервованных координат судна e , которая определяется отношением значений минимально возможной ковариационной матрицы $K(\Delta f, \Delta w)_{\min}$, полученной при условии, что предполагаемая и истинная плотности распределения совпадают, к ковариационной матрице $K(\Delta f, \Delta w)$, в которой упомянутые плотности не совпадают [10]:

$$e = \frac{K(\Delta f, \Delta w)_{\min}}{K(\Delta f, \Delta w)},$$

где Δf и Δw — составляющие векторной погрешности по широте и отстоянию.

В работе [9], с учетом результатов работы [10], получены выражения для ковариационных матриц $K(\Delta f, \Delta w)$ и $K(\Delta f, \Delta w)_{\min}$, которые имеют следующий вид:

$$K(\Delta f, \Delta w) = \frac{p}{q^2 \Delta} \left\| \begin{array}{cc} \sum_{i=1}^m \sin^2 \alpha_i & -\sum_{i=1}^m \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ -\sum_{i=1}^m \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{i=1}^m \cos^2 \alpha_i \end{array} \right\|,$$

$$\text{где } \Delta = \left[\left(\sum_{i=1}^m \cos^2 \alpha_i \right) \left(\sum_{i=1}^m \sin^2 \alpha_i \right) - \left(\sum_{i=1}^m \sin \alpha_i \cos \alpha_i \right)^2 \right],$$

$$K(\Delta f, \Delta w)_{\min} = \frac{1}{s \Delta} \left\| \begin{array}{cc} \sum_{i=1}^m \sin^2 \alpha_i & -\sum_{i=1}^m \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ -\sum_{i=1}^m \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{i=1}^m \cos^2 \alpha_i \end{array} \right\|,$$

где α_i — направления градиентов линий положения, m — число линий положения.

В полученных выражениях p , q и s являются несобственными интегралами, которые зависят от плотностей $\varphi(\xi)$ и $f(x)$. Согласно работе [10], данные интегралы выражаются следующим образом:

$$q = \int_{R1} f(x) \left(\frac{\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x) \right) - \left(\frac{\partial}{\partial \xi} - \varphi(x) \right)^2}{\varphi^2(x)} \right) dx,$$

$$p = \int_{R1} f(x) \left(\frac{\left(\frac{\partial}{\partial x} \varphi(x) \right)^2}{\varphi(x)} \right) dx \quad \text{и} \quad s = \int_{R1} \frac{\left(\frac{\partial}{\partial x} f(x) \right)^2}{f(x)} dx.$$

Следовательно, эффективность обсервованных координат судна $e = \frac{q^2}{ps}$.

В рассматриваемом случае, когда плотность предполагаемого и действительного распределений описана формулами (1) и (4), несобственные интегралы p , q и s выражаются следующим образом:

$$q = -\frac{1}{\sigma^2};$$

$$p = \frac{1}{\sigma^4} \frac{2\alpha}{2n-1};$$

$$s = \frac{(n+1)(2n+1)}{2\alpha(n+2)},$$

а эффективность обсервованных координат судна имеет следующий вид:

$$e = \frac{(n+2)(2n-1)}{(n+1)(2n+1)} = 1 - \frac{3}{2n^2 + 3n + 1}.$$

Выводы

1. Отмечается, что при использовании избыточных измерений навигационных параметров повышается точность контроля места судна, координаты которого оцениваются методом наименьших квадратов. Указывается на возможность отличия закона распределения вероятностей случайных погрешностей измерений от закона Гаусса.

2. Приведена модель формирования смешанного закона распределения вероятностей случайных погрешностей навигационных измерений, плотность которого выражается в явном виде.

3. Показано, что при определении координат судна по избыточным измерениям навигационных параметров, погрешности которых распределены по смешанному закону, эффективность координат, рассчитанных методом наименьших квадратов меньше единицы, что свидетельствует о потере их точности.

4. Получено выражение для оценки эффективности обсервованных координат, из которого следует, что при изменении существенного параметра n смешанного распределения от одного до шести эффективность увеличивается от 0,5 до 0,967. Это объясняется тем, что с ростом n смешанное распределение стремится к нормальному закону.

5. Для обеспечения максимальной эффективности обсервованных координат их расчет следует производить методом максимального правдоподобия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашихин В. Т. Определение места судна / В. Т. Кондрашихин. — М.: Транспорт, 1989. — 250 с.
2. Hsu D. A. An analysis of error distribution in navigation / D. A. Hsu // Journal of Navigation. — 1979. — Vol. 32. — № 3. — Pp. 426–429.
3. Ткаченко А. С. К вопросу формирования модели смешанного распределения погрешностей навигационных измерений / А. С. Ткаченко // Судовождение. — 2005. — № 10. — С. 118–122.
4. Алексихин В. Г. Требования к плотности распределения среднего квадратического отклонения в модели смешанного распределения / В. Г. Алексихин, А. С. Ткаченко // Судовождение. — 2006. — № 11. — С. 9–13.
5. Комаровский Ю. А. Проблемы оценки точности определения места судна приёмниками СРНС Навстар GPS / Ю. А. Комаровский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2006. — № 2. — С. 100–107.
6. Monteiro L. S. What is the accuracy of DGPS? / S. L. Monteiro, T. Moore, C. Hill // Journal of Navigation. — 2005. — Vol. 58. — № 02. — Pp. 207–225.
7. Сорокин А. И. Гидрографические исследования Мирового океана / А. И. Сорокин. — Л.: Гидрометиздат, 1980. — 287 с.
8. Ткаченко А. С. Смешанные законы распределения погрешностей, плотности которых выражаются в явном виде / А. С. Ткаченко // Судовождение. — 2006. — № 12. — С. 93–99.
9. Ткаченко А. С. Совершенствование методов контроля и прогноза места судна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.13 / А. С. Ткаченко. — Одесса: ОНМА, 2009. — 24 с.
10. Мудров В. М. Методы обработки измерений / В. М. Мудров, В. Л. Кушко. — М.: Сов. радио, 1976. — 192 с.

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF COORDINATES OF SHIP AT SURPLUS MEASUREMENTS

Efficiency of coordinates of ship is considered, expected at the surplus measuring of navigation parameters by a least-squares method in the case when the law of probability distribution of error of initial selection differs from a normal law.

The mathematical model of the mixed distributing of errors of initial selection consisting of row of series of supervisions of errors of measuring of navigation parameter is resulted, thus in the series of supervisions of error inferior to the law of Gauss, and them middling quadratic declination changes by casual appearance from series to the series.

Analytical expression for the calculation of estimation of efficiency of the coordinates expected by a least-squares method is got, at presence of the surplus measurements of navigation parameters. Estimation of efficiency of coordinates of ship in the case of distributing of errors of selection on the mixed law is produced.

The results of calculation were shown, that at the change of substantial parameter of law of distributing from the minimum value to maximal one efficiency changes almost twice.

Keywords: errors of the navigation measuring, distributing of errors of initial selection, efficiency of coordinates of ship.

REFERENCES

1. Kondrashikhin, V. T. *Opređenje mesta sudna*. M.: Transport, 1989.
2. Hsu, D. A. "An analysis of error distribution in navigation." *The Journal of Navigation* 32.3: 426–429.
3. Tkashenko, A. S. "K voprosu formirovaniya modeli smeshannogo raspredeleniya pogreshnostej navigacionnykh izmerenij." *Sudovozhdenie* 10 (2005): 118–122.
4. Aleksishin, V. G., and A. S. Tkashenko. "Trebovaniya k plotnosti raspredeleniya srednego kvadraticeskogo otkloneniya v modeli smeshannogo raspredeleniya." *Sudovozhdenie* 11 (2006): 9–13.
5. Komarovskyy, Yu. A. "Problemy ocenki tochnosti opredeleniya mesta sudna prijemnikami SRNS Navstar GPS." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 2 (2006): 100–107.

6. Monteiro, Luís Sardinha, Terry Moore, and Chris Hill. "What is the accuracy of DGPS?." *Journal of Navigation* 58.02 (2005): 207–225.
7. Sorokin, A. I. *Gidrograficheskie issledovaniya Mirovogo okeana*. L.: Gidrometizdat, 1980.
8. Tkachenko, A. S. "Smeshannye zakony raspredeleniya pogreshnostej, plotnosti kotoryh vyrazhajutsja v javnom vide." *Sudovozhdenie* 12 (2006): 93–99.
9. Tkashenko, A. S. *Sovershenstvovanie metodov kontrolja i prognoza mesta sudna*: Abstract of Ph.D. (Tech.) dissertation. Odessa: ONMA, 2009.
10. Mudrov, V. M., and V. L. Kushko. *Metody obrabotki izmerenij*. M.: Sovetskoe radio, 1976.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурмака Игорь Алексеевич —
кандидат технических наук, доцент.
Национальный университет
«Одесская морская академия»
burmaka-mob@ukr.net
Астайкин Дмитрий Вадимович —
старший преподаватель.
Национальный университет
«Одесская морская академия»
astaykin@mail.ru
Алексейчук Богдан Михайлович — магистрант.
Национальный университет
«Одесская морская академия»
navi.dane4ka@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burmaka Igor Alekseevich —
PhD, associate professor.
National university "Odessa maritime academy"
burmaka-mob@ukr.net
Astaykin Dmitriy Vadimovich —
senior lecturer.
Scientific adviser Burmaka Igor Alekseevich,
National university "Odessa maritime academy",
astaykin@mail.ru
Alekseychuk Bogdan Mihaylovich —
master student.
Scientific adviser Burmaka Igor Alekseevich,
National university "Odessa maritime academy",
navi.dane4ka@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2015 г.

УДК 621.391

**Ю. Г. Ксенофонтов,
А. Н. Пивоваров**

К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ ПЕРИМЕТРАЛЬНЫХ ОХРАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

В статье рассмотрены стоимостные показатели разработки проектов охранной сигнализации (ОС) периметров морских объектов, проведен анализ стоимости проектирования систем охраны при различных значениях длин периметра применительно к морским объектам. С учетом рекомендованных методик в строительстве определены диапазоны стоимости проектирования; показано, что финансовые затраты на проектирование составляют десятки и сотни тысяч рублей, что сопоставимо со стоимостью таких этапов создания систем безопасности, как оценка уязвимости и разработка плана охраны. Предложена структурно-параметрическая модель периметральной охранной сигнализации, а также математические выражения, описывающие вероятности событий обнаружения нарушителя и отказа / безотказного состояния всех элементов охранной сигнализации. Указанные вероятности увязаны с регламентированными значениями вероятностей пресечения актов незаконного вмешательства (АНВ) в транспортно-технологический процесс.

Ключевые слова: система безопасности, периметр, комплекс технических средств охраны (ТСО), охранная сигнализация (ОС), рубеж охраны, участок блокировки, проектно-сметная документация, структурно-параметрическая модель.

Параметрические оценки технологического процесса функционирования ОС, включая надежность

Акты незаконного вмешательства (АНВ) на транспорте вызывают необходимость эффективного противодействия как на основе реализации Международного кодекса по охране судов и портовых средств (МК ОСПС), так и в рамках национальных документов Российской Федерации по транспортной безопасности. Указанное противодействие базируется на создании системы безопасности (СБ), которая включает в теоретико-множественном обозначении комплекс этапов E :

$$E = \{E_i\}, i = 1 \dots 7,$$

где $i = 1$ — оценка охраны или уязвимости (этап 1); $i = 2$ — план охраны, или план транспортной безопасности (этап 2); $i = 3$ — проект комплекса технических средств охраны (этап 3); $i = 4$ — поставка оборудования (этап 4); $i = 5$ — строительно-монтажные работы (этап 5); $i = 6$ — пусконаладка (этап 6); $i = 7$ — эксплуатация системы (этап 7). Наиболее значимыми с технической точки зрения и в финансовом плане являются этапы 3, 5, 6.

СБ морских объектов включают в себя следующие составляющие [1] – [3]:

- организационно-распорядительную часть;
- инженерно-технические средства охраны (ИТСО);
- силы транспортной безопасности.

В соответствии с приказом Министерства транспорта № 41 от 2011 г. и методикой оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры в рамках реализации Федерального закона от 09.02.2007 г. № 16-ФЗ «О транспортной безопасности», каждая из указанных составляющих разрабатывается субъектом транспорта либо специализированной организацией. Среди указанных составляющих особое место занимают ИТСО. Отмеченные средства по стоимости даже для среднего морского терминала составляют сотни тысяч рублей, а определение их состава и реализация требуемых характеристик базируются на структурно-параметрической модели, приведенной на рис. 1.

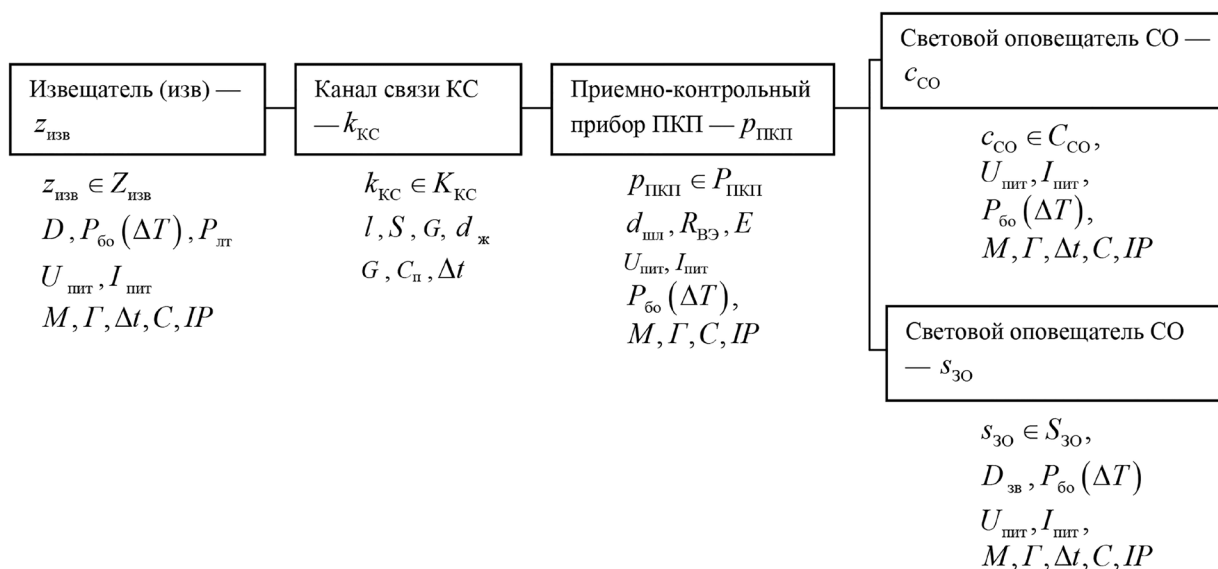


Рис. 1. Структурно-параметрическая модель ОС:

D — зона охраны; $U_{\text{пит}}$ — напряжение питания; $I_{\text{пит}}$ — ток питания;
 $P_{\text{бо}}(\Delta T)$ — вероятность безотказной работы в течение времени ΔT ;
 $P_{\text{лт}}$ — вероятность ложной тревоги в течение времени ΔT ; Γ — габариты, M — масса;
 Δt — температурный диапазон; C — стоимость; IP — степень защиты корпусов приборов

Условные обозначения

Параметры и тип кабеля: l — длина; S — сечение жилы; $d_{\text{ж}}$ — число жил; G — тип изоляции; $C_{\text{п}}$ — стоимость 1 пог. м.

Параметры ПКП: $d_{\text{шл}}$ — число шлейфов; $R_{\text{вэ}}$ — сопротивление выносного элемента;

E — емкость резервного аккумулятора.

Параметр звукового оповещателя: $D_{\text{зв}}$ — звуковое давление, дБ/м.

Данная модель отображает взаимосвязь элементов ОС и комплекс параметров, характеризующих каждый из этих элементов, хотя в общем цикле работ по созданию, например, ОС небольших объектов стоимость проекта лежит в пределах 4 – 8 % от общей стоимости комплекса ТСО. В зависимости от специфики объекта эта величина может быть выражена десятками и сотнями тысяч рублей, что весьма ощутимо для собственника объекта. В общем цикле строительных работ охранная сигнализация и другое охранное оборудование проходят специальным разделом проектной документации.

В ходе проектирования комплекса ТСО при выборе рационального варианта построения ОС можно использовать два подхода [1]:

1-й подход — максимизация $P_{обн}$ при ограничении на стоимость $C_{зад}$, тогда эффективность (Э) системы можно отобразить в виде

$$\mathcal{E} = \max P_{обн} \text{ при } C_{общ} \leq C_{зад} (C_{\max}), \quad (1)$$

2-й подход — минимизация $C_{общ}$ при ограничении на вероятность обнаружения $P_{обн}$, выражение эффективности Э, в данном случае, примет следующий вид:

$$\mathcal{E} = \min C_{общ} \text{ при } P_{обн} \geq P_{обн}^{зад} \quad (2)$$

где $C_{общ} = \sum_{j=1}^n C_j d_j$, $C_{зад} (C_{\max})$ — заданная (максимальная) стоимость; $C_{общ}$ — общая стоимость комплекса ТСО; C_j, d_j — стоимость и количество j -х видов элементов.

В соответствии с рекомендациями источников [3], [4], для оценки эффективности системы безопасности (Э) вводится критерий — *вероятность пресечения АНВ*:

$$P_{пр} = P_{обктсо} P_{нт}, \quad (3)$$

где $P_{пр}$ — вероятность пресечения АНВ;

$P_{обктсо}$ — вероятность обнаружения нарушителя комплексом ТСО;

$P_{нт}$ — вероятность нейтрализации нарушителя.

С учетом выражения (3) в выражении (2) параметр $P_{обктсо}$ следует заменить на $P_{пр}$.

Принимая во внимание информацию из источников [4], [5], в выражении (3) необходимо детализировать параметр $P_{обктсо}$, который, фактически, является произведением двух параметров в виде

$$P_{обктсо} = P_{об.изв.} P_{боктсо}, \quad (4)$$

где $P_{об.изв.}$ — вероятность обнаружения нарушителя извещателем; $P_{боктсо}$ — вероятность безотказной работы комплекса ТСО (всех элементов ОС).

С учетом приведенных в источниках [1] – [6] рекомендованных значений вероятности $P_{пр}$ пресечения АНВ [3], в табл. 1 представлены рассчитанные нами необходимые значения $P_{нт}$ при вероятности $P_{обктсо}$. Эти значения $P_{нт}$ являются нормативом для сил транспортной безопасности, которые должны с указанной вероятностью обеспечить нейтрализацию нарушителя (захват или уничтожение).

Указанные параметры $P_{об.изв.}$ и $P_{боктсо}$ всех элементов ОС определяются на основе дерева вероятностей событий по следующим уровням: вероятности безотказности извещателя, вероятности обнаружения нарушителя извещателем, вероятности безотказности канала связи, приемно-контрольного прибора и оповещателей.

Таблица 1

Значения вероятности нейтрализации нарушителя $P_{нт}$ для различных категорий объектов при фиксированном значении вероятности безотказной работы всех элементов ОС $P_{боктсо}$

$P_{обктсо}$	Вероятность нейтрализации нарушителя $P_{нт}$ для категорий объектов			
	1-я	2-я	3-я	4-я
	$P_{пр} = 0,9$	$P_{пр} = 0,8$	$P_{пр} = 0,7$	$P_{пр} = 0,6$

Таблица 1
(Окончание)

0,85	1,06	0,94	0,82	0,7
0,9	1	0,89	0,78	0,67
0,95	0,95	0,84	0,74	0,63
0,97	0,93	0,82	0,72	0,62

Как видно из табл. 1, для объектов 1-й категории вероятность обнаружения $P_{\text{об.ТСО}}$ должна быть более 0,9 (так как значения $P_{\text{нт}}$ не могут быть равны или больше единицы). При меньшем значении $P_{\text{об.ТСО}}$ требуемая величина $P_{\text{пр}}$ неосуществима. С учетом данных табл. 1 в табл. 2 сведены требуемые расчетные значения вероятности безотказной работы комплекса ТСО $P_{\text{об.ТСО}}$ для диапазона значений $P_{\text{об.изв}}$ и $P_{\text{об.ТСО}}$.

Таблица 2

Требуемые значения вероятности $P_{\text{об.ТСО}}$ безотказной работы ОС

$P_{\text{об.ТСО}}$	Вероятность безотказной работы ОС $P_{\text{об.ТСО}}$			
	$P_{\text{об.изв}} = 0,8$	$P_{\text{об.изв}} = 0,85$	$P_{\text{об.изв}} = 0,9$	$P_{\text{об.изв}} = 0,95$
0,85	1,06	1	0,94	0,89
0,9	1,12	1,06	1	0,947
0,95	1,19	1,12	1,06	1
0,97	1,21	1,14	1,08	1,02

Как видно из табл. 2, $P_{\text{об.ТСО}}$ требует $P_{\text{об.изв}} = 0,9 - 0,95$ при меньших значениях $P_{\text{об.изв}}$ — значения $P_{\text{об.ТСО}}$ не реализуемы. В соответствии с законом Пуассона [6], справедливым для радиоэлектронного оборудования, и ориентируясь на приводимые вероятности безотказной работы элементов ОС, пересчитав таковые в интенсивности отказов, можно определить требуемые значения $P_{\text{об.ТСО}}$ для конкретных интервалов времени ΔT :

$$P_{\text{об.ТСО}} = e^{-\lambda \Delta T}, \quad (5)$$

где λ — интенсивность отказов; ΔT — интервал времени.

Так, например, для суммарного среднего времени $T_{\text{ср}}$ безотказной работы 40000 – 60000 ч, интенсивность отказов $\lambda = 1/T_{\text{ср}}$ — 0, 0000025 – 0,000017. Для $\lambda = 0,000025$ при $\Delta T = 1000$ ч $P_{\text{об.ТСО}} = 0,975$ и отвечает требуемым значениям $P_{\text{об.ТСО}}$ из табл. 2.

Стоимостные оценки проектирования ОС

Стоимостные оценки C проекта базируются на рекомендованных методиках и справочных материалах [7] – [9]. В общем случае величина стоимости проекта охранной сигнализации может быть представлена как $C = f(L, a, b)$, где L — длина периметра объекта; a, b — некоторые постоянные числа для определенного диапазона L . В основе расчетов лежит базовая цена B , умноженная на произведение поправочных коэффициентов K_i , общее число которых более десяти. При этом для морских объектов из таких коэффициентов применимы следующие: использование импортного оборудования $K = 1,3$; предпроектное обследование $K = 1,1 - 1,3$; наличие взрывоопасных зон $K = 1,3$; наличие перепадов по периметру более 1,5 м, $K = 1,3$; количество участков охраны, кратное пяти, $K = 1,3$; наличие двух рубежей охраны, $K = 1,5$; уровень инфляции $K_{\text{инф}}$.

Стоимость проекта с учетом всех затрат и прибыли в текущих ценах $C_{\text{пр}}$:

$$C_{\text{пр}} = (a + bX) \cdot \prod_{i=1}^n K_i, \quad (6),$$

где выражение в круглых скобках — базовая цена проекта на 1 января 2000 г., руб.; a, b — постоянные значения для определенного интервала, руб.; X ; X — длина периметра объекта, км.

Базовые цены, указанные в источнике [7], учитывают все затраты в составе себестоимости, указанные в источнике [8], включая прибыль. В табл. 3 сведены расчетные данные стоимости проектирования ОС периметров морских объектов для простых по сложности условий в соответствии с рекомендациями методики [7]: $K_1 = 1,2$ — предпроектное обследование, число участков охраны, кратное пяти, $K_{инф} = 3,64$ (согласно прил. 3 к письму от 12.01.2011 № ДПР/11-3/3-5).

Таблица 3

Стоимость проекта охранной сигнализации периметра в зависимости от длины и числа участков

№ п/п.	Длина периметра, км	Значение базовой цены, руб.	Поправочный коэффициент на количество участков блокировки K_y	Стоимость, руб.
1	До 0,2	3721,60	1,0 (до 5 уч.)	16255,95
2	От 0,2 до 0,4	3721,60 – 6111,70	1,0 (до 5 уч.)	16255,95 – 26695,91
3	От 0,4 до 0,6	6111,70 – 8019,78	1,0 (до 5 уч.)	26695,91 – 35030,40
4	От 0,6 до 0,8	8019,78 – 9303,10	1,0 (до 5 уч.)	35030,40 – 40635,94
5	От 0,8 до 1,0	9303,10 – 10501,30	1,15 (5 уч.)	40635,94 – 52750,13
6	От 1,0 до 2,0	10501,30 – 16414,60	1,15 (5 уч.)	52750,13 – 82453,82
7	От 2,0 до 3,0	16414,60 – 22010,00	1,15 (5, 6 уч.)	82453,82 – 110560,63
8	От 3,0 до 4,0	22010,00 – 26836,70	1,30 (8 – 10 уч.)	110560,63 – 152389,52
9	От 4,0 до 5,0	26836,70 – 30314,90	1,30 (8 – 10 уч.)	152389,52 – 172140,13
10	От 5,0 до 6,0	30314,90 – 33652,40	1,45 (10 – 12 уч.)	172140,13 – 213140,84
11	От 6,0 до 7,0	33652,40 – 36851,30	1,45 (12 – 14 уч.)	213140,84 – 233401,39
12	От 7,0 до 9,0	36851,30 – 41180,60	1,60 (18 – 20 уч.)	233401,39 – 287802,98
13	От 9,0 до 11,0	41180,60 – 44827,80	1,60 (20 – 22 уч.)	287802,98 – 313292,53
14	От 11,0 до 13,0	44827,80 – 48129,70	1,75 (22 – 26 уч.)	313292,53 – 367903,43
15	От 13,0 до 15,0	48129,70 – 51206,20	1,90 (26 – 30 уч.)	367903,43 – 424970,95
16	От 15,0 до 25,0	51206,20 – 66404,40	2,65 (30 – 50 уч.)	424970,95 – 768644,21
17	Свыше 25,0	66404,40	2,65 (свыше 50 уч.)	768644,21

Выполненные ранее расчеты приведены на рис. 2.

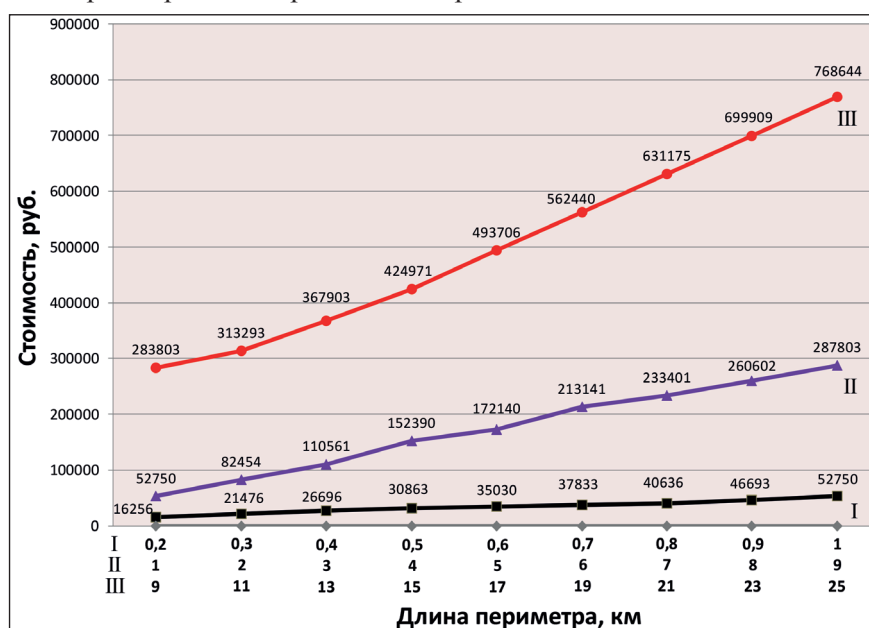


Рис. 2. Динамика роста стоимости проекта охранной сигнализации в зависимости от длины периметра объекта с учетом числа участков охраны

Следует отметить, что при необходимости получения грубой экспресс-оценки стоимости проектных работ по комплексу ТСО, можно воспользоваться материалами работы [10].

Выводы

1. Предложенный математический аппарат и выполненные расчеты позволяют предъявить требования к силам транспортной безопасности по вероятности $P_{пр}$ нейтрализации нарушителя, а также рассчитать необходимые значения вероятности $P_{обктсо}$ обнаружения нарушителя и вероятности $P_{боктсо}$ безотказной работы всего комплекса ОС для выполнения требуемых значений $P_{пр}$. На основе этих данных и приводимого в технических описаниях заводов-изготовителей охранного оборудования времени безотказной работы на основе закона Пуассона не представляет труда рассчитать $P_{боктсо}$ на заданный интервал времени ΔT .

2. Стоимость проекта охранной сигнализации периметра в сотни метров лежит в пределах от 16 до 53 тыс. руб., от 1 до 9 км — от 53 до 290 тыс. руб., от 9 до 25 км — от 290 до 770 тыс. руб. (см. рис. 2). Согласно методике, приведенной в пособии [9], стоимость проектной документации при длине периметра, меньшей 0,2 км, принимается такой же, как и при 0,2 км, а свыше 25 км — такой же, как и при 25 км.

3. Исходя из того, что для портовых средств характерны периметры длиной в сотни метров, а для морских портов — в километры и более, представленные материалы свидетельствуют о том, что затраты на проектные работы только по комплексу ТСО составляют, в лучшем случае, минимум десятки тысяч рублей для небольших объектов и сотни тысяч рублей для крупных, что соизмеримо с оценкой уязвимости или разработкой планов охраны объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пивоваров А. Н. Транспортная безопасность объектов, средства укрепления объектов и инженерно-технические системы охраны: учеб. пособие / А. Н. Пивоваров. — СПб.: ЗАО «СИБЕЛ», 2014. — 262 с.
2. Пивоваров А. Н. Новое в охране морских объектов / А. Н. Пивоваров, С. А. Левчук // Морской флот. — 2006. — № 4. — С. 52–53.
3. Пивоваров А. Н. К вопросу о транспортной безопасности морских объектов / А. Н. Пивоваров // Материалы VI Международного конгресса: «Цели развития тысячелетия» и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов»: науч.-практ. конф. «Геополитические факторы устойчивого развития Арктики и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций», Санкт-Петербург, 15–16 ноября 2013 г. — СПб., 2013. — С. 34–37.
4. ОДМ 218.6.001-2010. Методические рекомендации по проведению оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств морского и речного транспорта. — М.: Федеральное агентство морского и речного транспорта, 2010. — 49 с.
5. ГОСТ Р-2016. Методика проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств. Общие требования. Изд. офиц. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — М.: Стандартинформ, 2016. — 35 с.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для студ. вузов / Е. С. Вентцель. — М.: ИЦ «Академия», 2005. — 576 с.
7. МРР-3.2.06.07-10. Об утверждении сборника базовых цен на проектные работы для строительства, осуществляемые с привлечением средств бюджета города Москвы. Распоряжение департамента экономической политики и развития (ДЭПР) г. Москвы от 01.10.2010 № 56-Р. — М., 2010. — 151 с.
8. МДС81-15.2000. Методические рекомендации по составу и учету затрат, включаемых в себестоимость проектной и изыскательской продукции (работ, услуг) для строительства и формированию финансовых результатов / Госстрой России. — М.: ГУП ЦПП, 2003. — 16 с.
9. Практическое пособие по применению справочника базовых цен на проектные работы для строительства. Системы противопожарной и охранной защиты. — М.: Госстрой России, 1999. — 6 с.
10. Иванов И. В. Охрана периметров-2 / И. В. Иванов. — М.: Паритет Граф, 2000. — 196 с.

TO THE QUESTION OF DESIGN OF PERIMETRALNY SECURITY SYSTEMS FOR SEA OBJECTS

The article describes the project development cost parameters security alarm (SA) perimeters of the sea objects; an analysis of the cost of designing security systems for different values of the lengths of the perimeter in relation to the sea objects. In view of the recommended methods in the construction cost of the defined ranges of design; it shows that the financial cost of the design make hundreds of thousands of rubles, which is comparable with the cost of these steps to create a security system as a vulnerability assessment, develop a plan of protection. A structural-parametric model of perimeter alarm system, as well as mathematical expressions, describing the probability of events intruder detection and fault/trouble-free status of all elements of the operating system. Given the probability linked to the regulated value of the probability of repressing acts of unlawful interference (AUI) in the transport process.

Keywords: security system, perimeter, a set of technical means of protection (TMP), security alarm (SA), line protection, land lock, project documentation, structural-parametric model.

REFERENCES

1. Pivovarov, Aleksander N. *Transportnaya bezopasnost obektov, sredstva ukreplennosti obektov i inzhenerno-texnicheskie sistemy ohrany. Uchebnoe posobie*. SPb.: SIVEL, 2014.
2. Pivovarov, Aleksander N., and S. A. Levchuk. "Novoe v ohrane morskix obektov." *Morskoy flot*. 4 (2006): 52–53.
3. Pivovarov, Aleksander N. "K voprosu o transportnoj bezopasnosti morskix obektov." *Materialy VI mezhdunarodnogo kongressa: "Celi razvitiya tsysyacheletiya" i innovacionnye principy ustojchivogo razvitiya arkticheskix regionov*. Nauchno-prakticheskaya konferenciya "Geopoliticheskie faktory ustojchivogo razvitiya Arktiki i innovacionnye tekhnologii prognozirovaniya i predotvrashheniya chrezvychajnyx situacij". SPb., 2013: 34–37.
4. ODM 218.6.001-2010. Metodicheskie rekomendacii po provedeniyu ocenki uyazvimosti ob'ektov transportnoj infrastruktury i transportnyx sredstv morskogo i rechnogo transporta. M.: Federalnoe agentstvo morskogo i rechnogo transporta, 2010.
5. GOST R-2016. Metodika provedeniya ocenki uyazvimosti obektov transportnoj infrastruktury i transportnyx sredstv. Obshhie trebovaniya. M.: Standartinform, 2016.
6. Ventcel, E. S. *Teoriya veroyatnostej: Uchebnik dlya studentov vuzov*. M.: Izdatelskij centr "Akademiya", 2005.
7. MRR-3.2.06.07-10. Ob utverzhdenii sbornika bazovykh cen na proektnye raboty dlya stroitelstva, osushhestvlyaemye s privlecheniem sredstv byudzheta goroda Moskv. M., 2010.
8. MDS81-15.2000. Metodicheskie rekomendacii po sostavu i uchetu zatrat, vkluyuchaemyx v sebestoimost proektnoj i izyskatelskoj produkcii (rabot, uslug) dlya stroitelstva i formirovaniyu finansovykh rezultatov. M.: GUP CPP, 2003.
9. *Prakticheskoe posobie po primeneniyu Spravochnika bazovykh cen na proektnye raboty dlya stroitel'stva. Sistemy protivopozharnoj i oxrannoj zashhity*. M.: Gosstroj Rossii, 1999.
10. Ivanov, I. V. *Oxrana perimetrov – 2*. M.: Paritet Graf, 2000.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ксенофонтов Юрий Геннадьевич —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
ksenofontov.ura@mail.ru, kaf_rmrf@gumrf.ru
Пивоваров Александр Николаевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
panicol@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ksenofontov Yuriy Gennadievich —
Senior Lecturer.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
ksenofontov.ura@mail.ru, kaf_rmrf@gumrf.ru
Pivovarov Aleksander Nicolaevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
panicol@mail.ru

РАСЧЕТ КООРДИНАТ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ШТАБЕЛЯ ГРУЗА ПРИ ДИФФЕРЕНТЕ МАЛОТОННАЖНОГО СУДНА

В рейсах малотоннажных судов между портами Европы, в бассейне Северного, Норвежского и Балтийского морей часто возникает необходимость одновременной перевозки нескольких видов навалочных грузов. Размещение их в трюме отдельными штабелями зачастую осуществляется с использованием метода «естественной» сепарации. При такой загрузке грузовой помощник капитана считает, что каждая насыпь имеет свою массу и координаты центра тяжести, создает свой момент относительно миделя и т.д.

В статье предложены формулы, которые позволяют грузовому помощнику капитана рассчитать координаты центра тяжести каждого штабеля сместившегося груза в зависимости от линейных размеров трюма, угла естественного откоса груза и начального дифферента судна для дальнейшего их использования в судовой грузовой программе при расчете остойчивости судна.

Таким образом, рассмотрен системный подход к организации грузовых работ помощником капитана на однострунных малотоннажных судах, который позволяет рассчитать все необходимые параметры в зависимости от геометрической формы трюма и физических свойств груза и получить ответ о возможности осуществления такой перевозки.

Ключевые слова: малотоннажное судно, дифферент, расчет координат центра тяжести штабеля груза.



АКТУАЛЬНОСТЬ рассматриваемой темы обуславливается усилением роли эффективного планирования грузовых операций судна, как одного из важнейших элементов судоводительской работы. Рациональная загрузка судна — важная составляющая организации работы флота как с технической, так и с экономической стороны. Она должна быть такой, чтобы исключить возможность потерь провозной способности судна и при этом обеспечить оптимальное использование грузоподъемности и грузоместимости судна. Сейчас, когда мировой флот пополняется малотоннажными «новостроями», судовая администрация должна быть готова к специфике работы при эксплуатации таких транспортных средств.

При перевозке навалочных или насыпных грузов между портами Европы, в бассейне Северного, Норвежского и Балтийского морей малотоннажными судами имеют место случаи, когда в рейсе одновременно грузится несколько видов таких грузов. Грузовому помощнику капитана при составлении грузового плана необходимо определить массу и размеры каждого штабеля в трюме, а также координаты их центров тяжести для дальнейших расчетов остойчивости судна.

Безопасная перевозка навалочных и насыпных грузов была рассмотрена в трудах отечественных и зарубежных исследователей [1], [2]. Математическая модель оптимизации процесса загрузки балкеров и выбора оптимального варианта проведения грузовых операций с целью обеспечения их мореходной безопасности предложена в работе [3]. Расчет высоты штабеля навалочного груза при загрузке судов типа «коастер» и возможное смещение его центра тяжести представлены в публикациях [4], [5]. Метод «естественной» сепарации и диаграмма графического расчета массы навалочных грузов при их перевозке на судах типа «коастер» изложены в статьях [6], [7]. Удифферентовка балкера при транспортировке навалочных грузов рассмотрена в публикации [8]. Математическая модель определения конфигурации поверхности насыпного груза в трюме судна методом Нелдера-Мида изложена в работе [9]. Система автоматизированного контроля грузовых операций крупнотоннажного балкера представлена в статье [10]. Однако по сей день не рассмотрены случаи, когда грузовому помощнику капитана необходимо выполнить расчеты грузового плана и остойчивости малотоннажного судна при наличии дифферента.

Теоретические исследования и натурные наблюдения в реальных рейсах т/х «Wilson Bilbao» позволяют предложить формулы для расчета координат центра тяжести каждого штабеля навалочного или насыпного груза при наличии дифферента судна. Наблюдения в рейсах т/х «Wilson Bilbao» подтвердили, что при посадке судна «на ровный киль» штабели груза, которые погружены в центральную часть трюма, в зависимости от их объема, имеют в сечении по диаметральной плоскости (ДП) форму равнобедренного треугольника (рис. 1, *III*) или равнобедренной трапеции (рис. 1, *II*). Углы у основания штабеля (φ) равны углам естественного откоса данного груза. Сечение по ДП штабелей груза, которые погружены в носовую и кормовую части трюма, могут иметь форму прямоугольного треугольника либо прямоугольной трапеции (рис. 1, *I*, *IV*).

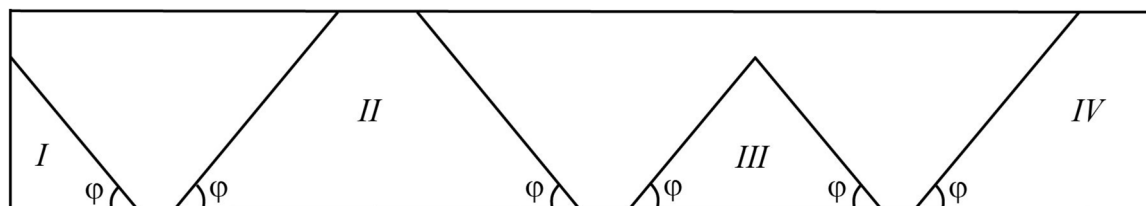


Рис. 1. Расположение штабелей груза, судно «на ровном киле»

Если в процессе погрузки возникает дифферент судна, то углы у основания штабелей груза изменяются на угол дифферента: один увеличивается, другой уменьшается (рис. 2).

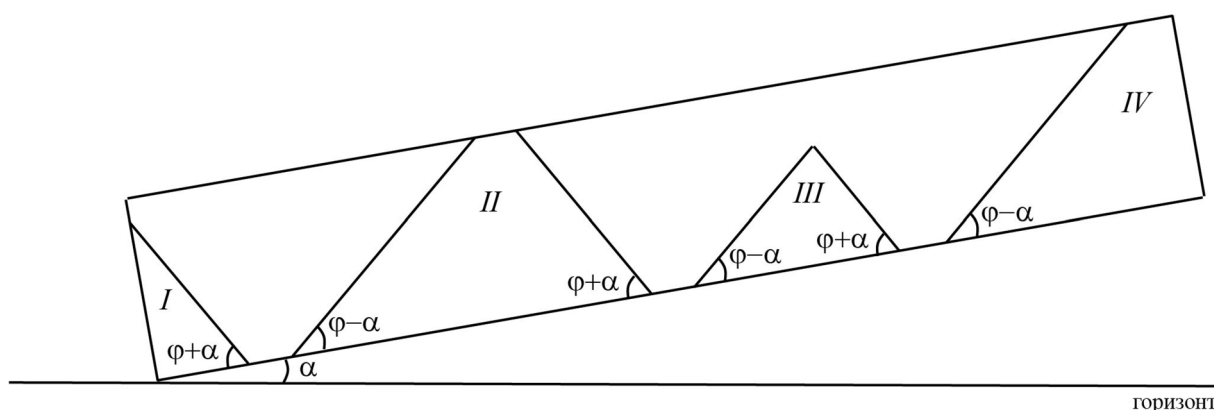


Рис. 2. Расположение штабелей груза, судно имеет дифферент

Для выполнения дальнейших расчетов штабель вида *III* (рис. 2) представим изображением, которое приведено на рис. 3. В этом случае, груз в сечении по ДП имеет форму треугольника ABD , высота которого $BM_2 = h$. Тогда:

$$AM_2 = h \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha), M_2D = h \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha), AD = h(\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha));$$

$$S_{ABD} = \frac{1}{2} h^2 (\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)) = \frac{h^2 \sin 2\varphi}{2 \sin(\varphi - \alpha) \sin(\varphi + \alpha)}. \quad (1)$$

Располагая систему координат так, что ее начало находится в вершине A , запишем координаты центра тяжести штабеля P_1 :

$$A(0; 0), B(h \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha); h), D(h(\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)); 0),$$

$$P_1 \left(\frac{h(2 \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}{3}; \frac{h}{3} \right). \quad (2)$$

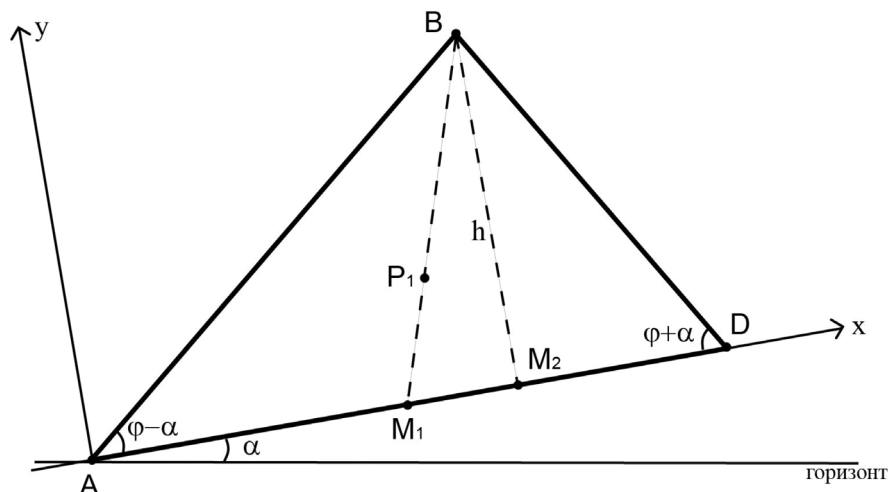


Рис. 3. Штабель навалочного груза в трюме при возникновении дифферента судна

Когда известна масса штабеля навалочного груза m , его насыпная плотность ρ и ширина трюма d , площадь продольного сечения штабеля груза $S = \frac{m}{\rho d}$. Отсюда определяем его высоту

$$h = \sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}} \quad (3)$$

и его основание

$$L = AD = \sqrt{2S(\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}. \quad (4)$$

Если высота h не превышает высоту трюма H , т. е.

$$\sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}} \leq H, \quad (5)$$

то штабель груза может иметь треугольную форму.

Штабель груза I и IV вида (рис. 2) может быть рассчитан аналогично, но тогда рассматриваются $\triangle BM_2D$ или $\triangle ABM_2$ (рис. 3).

Получим соответственно:
для $\triangle BM_2D$

$$h = \sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}}, \quad (6)$$

$$L = \sqrt{2S \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}, \quad (7)$$

для $\triangle ABM_2$

$$h = \sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}}, \quad (8)$$

$$L = \sqrt{2S \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}. \quad (9)$$

Возможное использование треугольной формы для $\triangle BM_2D$ и $\triangle ABM_2$ соответственно должно отвечать условиям:

$$\sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}} \leq H; \quad \sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}} \leq H. \quad (10)$$

Тогда координаты центра масс P_1 штабеля груза в системе координат, начало которой расположено в левой вершине основания, будут определяться:

для $\triangle BM_2D$

$$P_1\left(\frac{h \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}{3}; \frac{h}{3}\right), \quad (11)$$

для $\triangle ABM_2$

$$P_1\left(\frac{2h \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}{3}; \frac{h}{3}\right). \quad (12)$$

Штабель груза, в сечении параллельном ДП, имеет форму трапеции $ABCD$ (рис. 2, II и рис. 4).

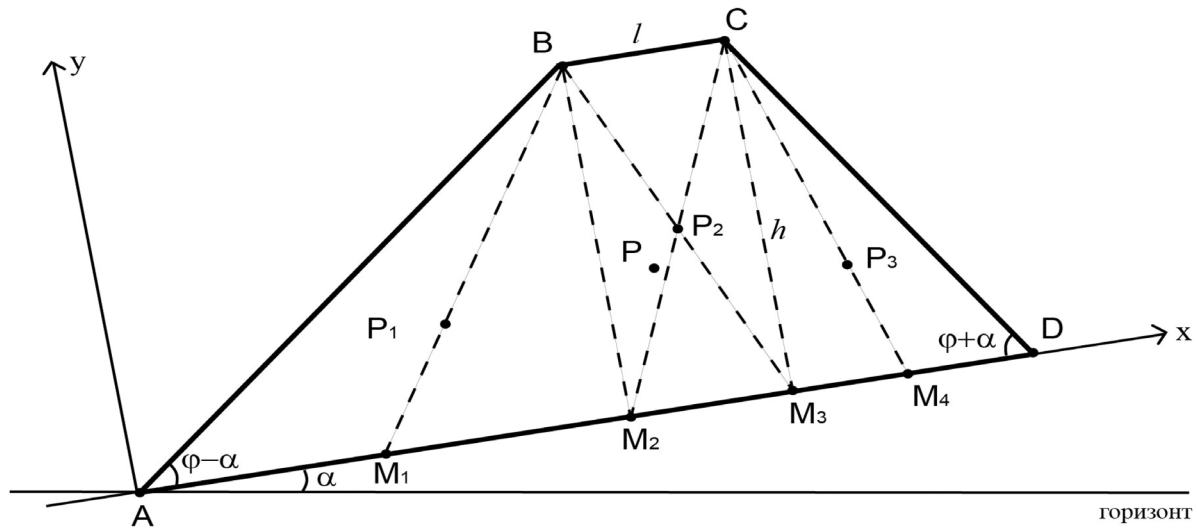


Рис. 4. Штабель навалочного груза в трюме при наличии дифферента судна

Верхнее основание штабеля равно l , высота h , M_2, M_3 — проекции вершин верхнего основания на нижнее, M_1 — середина отрезка AM_2 , M_2 — середина отрезка M_3D , а начало системы координат находится в вершине A , тогда координаты центров тяжести P_1, P_2, P_3 треугольника ABM_2 , прямоугольника M_2BCM_3 , треугольника M_3CD и площади этих фигур могут быть определены формулами:

для первого треугольника

$$A(0;0), \quad M_2(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha);0), \quad B(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha);H), \\ P_1\left(\frac{2H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}{3}; \frac{H}{3}\right), \quad S_1 = \frac{1}{2} H^2 \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha); \quad (13)$$

для прямоугольника

$$P_2\left(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \frac{l}{2}; \frac{H}{2}\right), \quad S_2 = lH; \quad (14)$$

для второго треугольника

$$M_3(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l;0), \quad C(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l;H), \quad (15)$$

$$D(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha);0),$$

$$P_3\left(\frac{2(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l) + (H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}{3}; \frac{H}{3}\right), \quad (16)$$

$$P_3 \left(\frac{3H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}{3}; \frac{H}{3} \right), \quad S_3 = \frac{1}{2} H^2 \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha). \quad (17)$$

Тогда координаты точки P :

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{x_1 S_1 + x_2 S_2 + x_3 S_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{1}{S_{ABCD}} \left[\frac{2H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}{3} \cdot \frac{1}{2} H^2 \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \right. \\ &+ \left(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \frac{l}{2} \right) \cdot lH + \frac{3H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}{3} \cdot \frac{1}{2} H^2 \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) \Big] = \\ &= \frac{H}{6S_{ABCD}} [2H^2 \operatorname{ctg}^2(\varphi - \alpha) + 6Hl \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l^2 + \\ &+ 3H^2 \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) + 3lH \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) + H^2 \operatorname{ctg}^2(\varphi + \alpha)], \end{aligned} \quad (18)$$

$$y_0 = \frac{y_1 S_1 + y_2 S_2 + y_3 S_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{H^2}{6S_{ABCD}} [H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)], \quad (19)$$

$$\begin{aligned} P \left(\frac{H}{6S} [2H^2 c_1^2 + 6Hl c_1 + 3l^2 + 3H^2 c_1 c_2 + 3lH c_2 + H^2 c_2^2]; \frac{H^2}{6S_{ABCD}} [H c_1 + 3l + H c_2] \right), \\ c_1 = \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha), \quad c_2 = \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha). \end{aligned} \quad (20)$$

Для расчета штабеля груза вида IV (рис. 2) рассмотрим трапеции $ABCM_3$ или M_2BCD (рис. 4). Аналогично получим координаты центра масс P относительно левой вершины нижнего основания:

для трапеции $ABCM_3$

$$P \left(\frac{H}{6S} [2H^2 \operatorname{ctg}^2(\varphi - \alpha) + 6Hl \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l^2]; \frac{H^2}{6S} [H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l] \right), \quad (21)$$

для трапеции M_2BCD

$$P \left(\frac{H}{6S} [3l^2 + 3lH \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) + H^2 \operatorname{ctg}^2(\varphi + \alpha)]; \frac{H^2}{6S} [3l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)] \right). \quad (22)$$

При погрузке могут возникать погрешности распределения штабелей груза, которые вызваны неточностью данных о характеристиках груза, ошибках позиционирования погрузочного устройства и другими причинами. Обозначим: погрешность расположения левого и правого краев основания груза через Δl_l и Δl_r соответственно, погрешности координат центра масс через Δx и Δy , погрешность высоты и ширины основания штабеля груза Δh и ΔL .

Для штабеля треугольной формы ширина основания равна

$$L = \sqrt{2 \frac{m}{\rho d} (\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}. \quad (23)$$

Для оценки ΔL находим частные производные этого выражения по переменным φ и ρ , в значениях которых возможны наибольшие погрешности:

$$\frac{\partial L}{\partial \rho} = \sqrt{2 \frac{m}{d} (\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))} \cdot \left(-\frac{1}{2\rho\sqrt{\rho}} \right) = \frac{-L}{2\rho};$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \varphi} &= \sqrt{2 \frac{m}{\rho d}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}} \cdot \left(\frac{-1}{\sin^2(\varphi - \alpha)} + \frac{-1}{\sin^2(\varphi + \alpha)} \right) = \\ &= \frac{-2L}{\sin 2\varphi} \cdot \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi}. \end{aligned} \quad (24)$$

Учитывая, что α обычно не превышает 5° , $0,985 < \cos \alpha < 1$ и при $\varphi < 45^\circ$, $\cos 2\varphi > 0$ имеем:

$$1 - \cos 2\varphi < 1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha < 1 - 0,985 \cos 2\varphi;$$

$$0,985 - \cos 2\varphi < \cos 2\alpha - \cos 2\varphi < 1 - \cos 2\varphi;$$

$$\frac{1 - \cos 2\varphi}{1 - \cos 2\varphi} < \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi} < \frac{1 - 0,985 \cos 2\varphi}{0,985 - \cos 2\varphi};$$

$$1 < \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi} < \frac{1 - 0,985 \cos 2\varphi}{0,985 - \cos 2\varphi}.$$

Функция $\frac{1 - 0,985x}{0,985 - x} = 0,985 \frac{1,015 - x}{0,985 - x} = 0,985 \frac{0,985 + 0,03 - x}{0,985 - x} = 0,985 \left(1 + \frac{0,03}{0,985 - x} \right)$ мо-

нотонно возрастает при $x < 0,985$. Рассматривая φ в пределах от 30° до 45° , получим, что $0,5 > \cos 2\varphi > 0$ и

$$1 < \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi} < \frac{1 - 0,985 \cos 2\varphi}{0,985 - \cos 2\varphi} < 1,046.$$

Следовательно, из (24) получаем:

$$\frac{-2L}{\sin 2\varphi} \cdot 1,046 < \frac{\partial L}{\partial \varphi} < \frac{-2L}{\sin 2\varphi};$$

$$\frac{-2,092L}{\sin 2\varphi} < \frac{\partial L}{\partial \varphi} < \frac{-2L}{\sin 2\varphi}. \quad (25)$$

Далее полагаем, что $\frac{\partial L}{\partial \varphi} \approx \frac{-2L}{\sin 2\varphi}$. Тогда из (25) следует, что ошибка при таком допущении не превысит 5 %.

Представляем приращение функции $L(\varphi, \rho)$ в виде дифференциала

$$\Delta L = \frac{\partial L}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial L}{\partial \rho} \Delta \rho;$$

$$\Delta L = \frac{-2L}{\sin 2\varphi} \cdot \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi} \Delta \varphi + \frac{-L}{2\rho} \Delta \rho;$$

$$\Delta L \approx \frac{-2L}{\sin 2\varphi} \Delta \varphi + \frac{-L}{2\rho} \Delta \rho. \quad (26)$$

Здесь $\Delta \varphi$, $\Delta \rho$ обозначают погрешности данных по углу естественного откоса и насыпной плотности, соответственно. Первое слагаемое формулы (26) $\varphi = 45^\circ$ дает отрицательную погрешность 3,5 см на каждый метр L и каждый градус $\Delta \varphi$. При меньших значениях φ абсолютная величина этого слагаемого растет. Второе слагаемое дает отрицательную погрешность 0,5 см на каждый метр L и каждый процент относительной погрешности $\frac{\Delta \rho}{\rho}$. Например, при $\Delta \varphi = -2^\circ$, $\rho = 1500$, $\Delta \rho = -100$, $L = 10$ м, получаем

$$\Delta L \approx 3,5 \cdot 2 \cdot 10 + 0,5 \cdot 10 \cdot \frac{100}{1500} \cdot 100 \approx 103 \text{ см}.$$

Таким образом, видно, что погрешность расчета ширины основания штабеля может оказаться довольно значительной и в результате при загрузке произойдет перекрытие штабелей и смешивание разных видов грузов. Чтобы предотвратить это, рекомендуется в процессе загрузки контролировать формы штабеля (его ширину основания и высоту) в момент времени, соответствующий примерно загрузке половины массы штабеля, и в конце загрузки всего штабеля. В это же время уточняется значение дифферента судна. Из формул (1), (2) получаем:

$$h = \sqrt{\frac{2m}{\rho d} \cdot \frac{1}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}}; \quad (27)$$

$$L = \sqrt{2 \frac{m}{\rho d} (\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}; \quad (28)$$

$$\frac{L}{h} = \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) = \frac{2 \sin 2\varphi}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi}. \quad (29)$$

Решив последнее уравнение относительно φ , находим его уточненное значение

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{h}{L \cos^2 \alpha} + \sqrt{\frac{h^2}{L^2 \cos^4 \alpha} + \operatorname{tg}^2 \alpha} \right). \quad (30)$$

Теперь из (27) получим уточненное значение насыпной плотности

$$\rho = \frac{2m}{dh^2} \cdot \frac{1}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}. \quad (31)$$

Уточненные значения вносятся в программу расчета плана погрузки и, при необходимости, корректируется план выполнения грузовых операций.

Для оценки погрешности уточненного значения φ перепишем (28) в следующем виде:

$$L(\cos 2\alpha - \cos 2\varphi) = 2h \sin 2\varphi. \quad (32)$$

Тогда погрешность определения высоты

$$\frac{\partial \varphi}{\partial h} = \frac{\sin 2\varphi}{L \sin 2\varphi - 2h \cos 2\varphi}. \quad (33)$$

Аналогично, погрешность при определении ширины основания

$$\frac{\partial \varphi}{\partial L} = \frac{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi}{4h \cos 2\varphi - 2L \sin 2\varphi}. \quad (34)$$

Отсюда примерная погрешность определения угла естественного откоса (в радианах) таким способом равна

$$\Delta \varphi \approx \frac{\partial \varphi}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial \varphi}{\partial h} \Delta h = \dots = \frac{(\cos 2\alpha - \cos 2\varphi) \Delta L - 2 \sin 2\varphi \Delta h}{4h \cos 2\varphi - 2L \sin 2\varphi}. \quad (35)$$

Здесь ΔL , Δh — ошибки измерений величин L и h . Учитывая (31), полученное выражение можно упростить:

$$\Delta \varphi \approx \frac{2 \frac{h}{L} \sin 2\varphi \Delta L - 2 \sin 2\varphi \Delta h}{4h \cos 2\varphi - 2L \sin 2\varphi} = \frac{\frac{h}{L} \Delta L - \Delta h}{2h \operatorname{ctg} 2\varphi - L}. \quad (36)$$

ΔL и Δh можно рассматривать как приблизительно равномерно распределенные независимые случайные величины, $|\Delta L| \leq 0,5$ м, $|\Delta h| \leq 0,2$ м. Тогда их среднеквадратические ошибки составляют примерно $\sigma_L \approx 0,29$ м и $\sigma_h \approx 0,12$ м, а среднеквадратическая ошибка φ составит

$$\sigma_\varphi \approx \sqrt{\frac{\frac{h^2}{L^2} \sigma_L^2 + \sigma_h^2}{|2h \operatorname{ctg} 2\varphi - L|}}. \quad (37)$$

При $L = 10$ м, $h = 5$ м, например, получим $\sigma_\varphi \approx 0,018 \approx 1^\circ$. Использование усредненных значений для двух измерений позволит уменьшить дисперсию ошибки еще примерно в 1,4 раза. Получение уточненного значения L в конце загрузки даст возможность скорректировать план дальнейшей погрузки малотоннажного судна.

Расчет оптимального расположения штабелей грузов в трюме

На практике, у автора, при выполнении рейсов т/х «Wilson Bilbao» ($DW = 3500$ т, размер грузового трюма $L \times B \times H = 62,4 \times 10 \times 6$ м, $V = 3744$ м³), возникала необходимость загружать судно несколькими видами грузов, для чего использовался метод «естественной» сепарации. Таким же способом часто перевозят грузы одного происхождения, но с разными физическими свойствами или различным гранулометрическим составом. В одном из рейсов (порт погрузки — Eikefet (Норвегия), порт выгрузки — Коеге (Дания)) фрахтователем была поставлена задача загрузить судно щебнем (масса по коносаменту 3450 т, удельный погрузочный объем — 0,6 – 0,8 м³/т, угол естественного откоса — 32 – 43°) с обязательным разделением груза на три отдельных штабеля. Груз нельзя было смешивать, а ответственность за качество транспортировки возлагалась на судовую администрацию. Щебень разделялся на три штабеля, которые составляли одну грузовую партию, и имел определённое дробление в каждом штабеле, а размеры частиц составляли 8 – 12 мм, 18 – 25 мм и 30 – 40 мм, что и стало причиной таких требований фрахтователя (рис. 5).



Рис. 5. Загрузка трёх различных штабелей груза щебня методом «естественной» сепарации на т/х «Wilson Bilbao»

Для решения поставленной задачи были использованы приведенные формулы.

В трюме требовалось разместить $n = 3$ видов грузов (обычно $2 \leq n \leq 5$) так, чтобы при погрузке, транспортировке и выгрузке эти грузы не смешивались. Масса m_k , насыпная плотность ρ_k , угол естественного откоса ϕ_k для каждой партии груза, а также размеры трюма, угол дифферента α известны. Каждый штабель груза можно было разместить в центральной части трюма и в его крайних частях: носовой или кормовой.

Для каждого из грузов просчитываем форму и габариты штабеля при вариантах размещения (корма, центр, нос). Треугольная форма штабеля возможна при выполнении условий (5), (10) соответственно, а длина нижнего основания L_{kk} , L_{kc} , L_{kn} штабеля груза определяется по формулам (4), (7), (9).

Чтобы задать способ размещения R_j грузов, было принято решение, какой груз будет расположен в кормовой части, а какой — в носовой. Остальной груз будет размещен в центральной части. Таким образом, фактически имеем всего $N = n(n - 1)$ способов размещения грузов в трюме. Например, при $n = 3$, имеем $N = 3 \cdot 2 = 6$ и т. д.

Для каждого из этих способов была определена сумма длин нижних оснований $\sum_{k=1}^N L_k$ штабелей всех грузов. Если для рассматриваемого способа размещения выполняется условие

$$\sum_{k=1}^N L_k < L, \quad (38)$$

то такой способ считаем допустимым. Если есть несколько допустимых способов, то среди них грузовой помощник капитана выбирает оптимальный — такой, при котором сумма $\sum_{k=1}^N L_k$ принимает минимально возможное значение.

Для определения расстояний между основаниями штабелей груза, высоты и верхнего основания каждого штабеля, координат центра тяжести для каждого из штабелей относительно левого края его основания, были использованы формулы (2), (11), (12), (20) или (22) — в зависимости от формы штабеля и места его расположения.

Если условие (38) не выполняется ни для одного из способов, то размещение такого набора грузов в трюме судна невозможно и нужно уменьшить массу одного из предъявляемых к перевозке грузов.

В результате выполненных расчетов были определены все необходимые характеристики каждого штабеля груза щебня, масса носового штабеля составила 1300 т, среднего — 1000 т, кормового — 1150 т. Грузовой план судна на предстоящий рейс приведен на рис. 6.

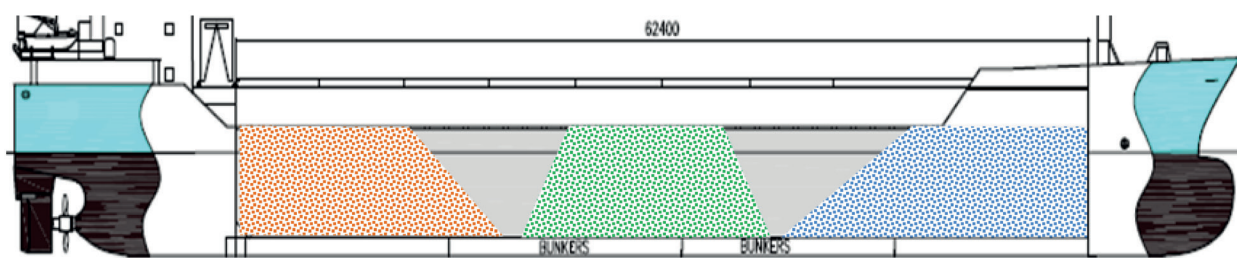


Рис. 6. Грузовой план т/х «Wilson Bilbao» при перевозке щебня с использованием «естественной» сепарации

Выводы

1. Грузовому помощнику капитана при составлении грузового плана малотоннажного судна необходимо учитывать возможное пересыпание навалочного либо насыпного груза в результате возникновения дифферента во время погрузки.

2. Расчетные формулы (1) – (22) учитывают смещение груза при наличии дифферента судна и позволяют определить координаты центра тяжести каждого сместившегося штабеля в зависимости от линейных размеров трюма, угла естественного откоса груза и начального дифферента судна.

3. Поскольку трюм представляет единый модуль, то форма размещения в нём груза не может быть однозначной. Она может меняться по причине различных транспортных характеристик груза, внешних факторов и ограничений, которые возникают из-за условий перевозки или погрузки. Для разных форм размещения штабеля груза следует использовать соответствующие расчёты.

4. Условие (38) позволяет определить суммарную длину штабелей и служит дополнением к судовой грузовой программе, что сокращает затраты времени грузового помощника капитана при выполнении расчетов мореходных качеств судна после его погрузки.

5. Предлагаемые расчетные формулы позволяют облегчить работу экипажа, избежать ошибок при расчетах загрузки, а также могут послужить основой для разработок новых, более совершенных грузовых программ для малотоннажных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барановский М. Е. Безопасность морской перевозки навалочных грузов / М. Е. Барановский. — М.: Транспорт, 1985. — 189 с.
2. Tope I. E. Carriage of Bulk grain without temporary fitting / I. E. Tope // Naval Architect. — 1971. — № 3. — 457–471.
3. Цымбал Н. Н. Расчет границ множества допустимых стратегий проведения грузовых операций навалочных судов / Н. Н. Цымбал, Ю. Ю. Васьков // Судовождение. — 2004. — № 8. — С. 22–31.
4. Хомяков В. Ю. Расчет высоты штабеля навалочного груза при загрузке судов типа «коастер» / В. Ю. Хомяков, В. Д. Савчук // Материалы науч.-теор. конференции «Судоходство: перевозки, технические средства, безопасность», 19–20 ноября 2013 г. — Одесса: ОНМА, 2013. — С. 136–139.
5. Хомяков В. Ю. Смещение центра тяжести штабеля навалочного груза при загрузке судов типа «коастер» / В. Ю. Хомяков, В. Д. Савчук // Материалы VIII Всеукраинской науч.-техн. конференции молодых ученых и студентов «Совершенствование проектирования и эксплуатации морских судов и сооружений», 2–6 декабря 2013 г. — Севастополь, 2014. — С. 159–164.
6. Хомяков В. Ю. Загрузка судна типа «коастер» навалочным грузом с использованием метода «естественной» сепарации / В. Ю. Хомяков, В. Д. Савчук // Научный вестник Херсонской государственной морской академии. — 2014. — № 1 (10). — С. 64–70.
7. Хомяков В. Ю. Диаграмма графического расчета массы навалочных грузов при перевозке с «естественной» сепарацией / В. Ю. Хомяков, В. Д. Савчук // Материалы шестой Международной науч.-практ. конференции «Современные информационные и инновационные технологии на транспорте» (MINTT — 2014) 27–29 мая 2014 г. — Херсон: ХГМА, 2014. — С. 147–148.
8. Клименко Е. Н. Удифференровка балкера при перевозке навалочных грузов / Е. Н. Клименко, В. Д. Савчук // Судовождение. — 2005. — № 10. — С. 63–66.
9. Клименко Е. Н. Использование метода Нелдера-Мида для определения конфигурации поверхности насыпного груза в трюме судна / Е. Н. Клименко, В. Д. Савчук // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2014. — № 3 (8). — С. 41–46.
10. Клименко Е. Н. Система автоматизированного контроля грузовых операций балкера / Е. Н. Клименко // Судовождение. — 2014. — № 24. — С. 84–91.

THE CALCULATION OF THE COORDINATES OF CENTER OF GRAVITY OF A CARGO STACK AT THE TRIM OF SMALL-DISPLACEMENT VESSEL

At the voyages of small-displacement vessels between the ports of Europe, at the basins of the Northern, the Norwegian and the Baltic Seas, the necessity of the simultaneous carrying of different bulk cargos occurs. Their placement in the hold in separate stacks is carried out with the method of “intrinsic” separation. At such loading the cargo officer considers, that each bulk has its own weight and the coordinates of the center of the gravity, creates its moment in the midship section, etc.

The formulae, enabling the cargo officer to calculate the coordinates of the center of the gravity of each stack of the shifted cargo depending on the linear dimensions of a hold, the angle of repose of a cargo and the initial trim for the further application of them in the loading program at the calculation of the stability of a vessel, are given in the article.

Thus, the system approach to the organization of cargo works by officer in charge was considered on small tonnage single-hold vessels that allows you to calculate all the necessary parameters depending on the geometric shape of the hold and physical properties of the cargo and to get an answer about the feasibility of such transportation.

Keywords: small-displacement vessel, trim, calculation of coordinates of center of gravity of cargo stack.

REFERENCES

1. Baranovskij, M. E. *Bezopasnost morskoy perevozki navalochnyh грузov*. M.: Transport, 1985.
2. Tope, I. E. “Carriage of Bulk grain without temporary fitting.” *Naval Architect* 3 (1971): 457–471.
3. Cymbal, N. N., and Ju. Ju. Vaskov. “Raschet granic mnozhestva dopustimyh strategij provedenija грузовых операций navalochnyh судов.” *Sudovozhdenie* 8 (2004): 22–31.

4. Homjakov, V. Ju., and V. D. Savchuk. "Raschet vysoty shtabelja navalohnogo gruzu pri zagruzke sudov tipa "coaster"." *Materialy nauchno-teoreticheskoy konferencii «Sudohodstvo: perevozki, tehicheskie sredstva, bezopasnost», 19-20.II. 2013.* Odessa: ONMA, 2013: 136–139.
5. Homjakov, V. Ju., and V. D. Savchuk. "Smeshhenie centra tjazhesti shtabelja navalohnogo gruzu pri zagruzke sudov tipa "coaster"." *Materialy VIII Vseukrainskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenyh i studentov «Sovershenstvovanie proekttirovaniya i jekspluatacii morskikh sudov i sooruzhenij», 2-6.12. 2013.* Sevastopol, 2014: 159–164.
6. Homjakov, V. Ju., and V. D. Savchuk. "Zagruzka sudna tipa "coaster" navalohnym gruzom s ispolzovaniem metoda "estestvennoj" separacii." *Nauchnyj vestnik Hersonskoj gosudarstvennoj morskoy akademii* 1(10) (2014): 64–70.
7. Homjakov, V. Ju., and V. D. Savchuk. "Diagramma graficheskogo rascheta massy navalohnykh gruzov pri perevozke s "estestvennoj" separaciej." *Materialy shestoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye informacionnye i innovacionnye tehnologii na transporte» (MINTT — 2014) 27–29.05. 2014.* Herson: HGMA, 2014: 147–148.
8. Klimenko, E. N., and V. D. Savchuk. "Udifferentsirovka balkera pri perevozke navalohnykh gruzov." *Sudovozhdenie* 10 (2005): 63–66.
9. Klimenko, E. N., and V. D. Savchuk. "The use of Nelder-Mead method for the determination of the configuration of surface and weight of bulk cargo in the hold." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova* 3(8) (2014): 41–46.
10. Klimenko, E. N. "Sistema avtomatizirovannogo kontrolja gruzovykh operacij balkera." *Sudovozhdenie* 24 (2014): 84–91.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савчук Виктор Дмитриевич —
кандидат технических наук, профессор.
Одесская национальная морская академия
info@onma.edu.ua, nich@onma.edu.ua
Хомяков Виталий Юрьевич —
старший помощник капитана
т/х «Wilson Bilbao» MARLOW NAVIGATION LTD.
khomykov_vitaliy@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Savchuk Viktor Dmitrievich —
PhD, professor.
Odessa National Maritime Academy
info@onma.edu.ua, nich@onma.edu.ua
Khomyakov Vitaliy Jur'evich —
Chief officer
m/v «Wilson Bilbao» MARLOW NAVIGATION LTD.
khomykov_vitaliy@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04 ноября 2015 г.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 528.475

П. И. Барашок,
Ю. Г. Фирсов

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ МОРСКОГО ДНА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ДО СТРОИТЕЛЬСТВА ТРУБОПРОВОДА

В работе рассматриваются вопросы и опыт комплексного использования гидрографического, геофизического и океанологического оборудования, для изучения дна и верхнего слоя донных осадков с целью поиска, и способов безопасного устранения взрывоопасных объектов по трассе строительства трубопровода на примере проектов в Черном море. Уникальность работ связана с необходимостью изучения поверхности морского дна и выявления опасных объектов на больших глубинах, что требует использования автономных и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов, а также специальных комплексов позиционирования. Анализируются возможные ситуации расположения взрывоопасных объектов, учитывая особенности гидроакустической аппаратуры акцентируется внимание на построении линий для поиска придонных объектов. Рассмотрены вопросы использования российскими специалистами современного оборудования, обеспечивающего хорошее качество получаемых данных.

Ключевые слова: подводный трубопровод, инерциальные системы позиционирования, взрывоопасные объекты, автономный подводный аппарат, телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, гидроакустическая аппаратура, комплексное исследование микрорельефа.

Введение

Несмотря на текущие трудности, перспективы развития нефтяной промышленности в России чрезвычайно актуальны, так как от состояния российской нефтяной промышленности во многом зависит благополучие отечественной и мировой экономики в целом. Следовательно, пристальное внимание следует уделять строительству и своевременному обслуживанию трубопроводов, осуществляющих транспортировку сырья [1].

Морские магистральные газопроводы должны обладать повышенной надежностью при строительстве и эксплуатации с учетом особых условий: большие глубины моря, повышенная протяженность без промежуточных компрессорных станций, штормы, подводные течения, сейсмичность и другие факторы. Выбор трассы морского трубопровода должен производиться исходя из критериев оптимальности и основываться на следующих данных: характеристики грунта, батиметрии и морфологии морского дна, а также сведения об окружающей среде, сейсмической активности, районах рыболовства, судоходных фарватерах и якорных стоянках судов, районах свалки грунта, акваториях с повышенным экологическим риском. Особое значение имеет информация о характере и протяженности тектонических разломов. В качестве основных критериев оптимальности следует принимать техническую и экологическую безопасность сооружения [2]. При этом следует учитывать наличие на трассе трубопровода взрывоопасных объектов — ВОП. Для Черного моря, явившегося ареной двух мировых войн, данный вопрос является особенно актуальным.

Гидрографическое обеспечение проектирования прокладки морских трубопроводов

Для строительства систем трубопроводов необходимо иметь разнообразные и достоверные сведения о состоянии поверхности дна. Существенной частью этих сведений является информация, получаемая при выполнении гидрографических исследований с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), многолучевых эхолотов (МЛЭ), гидроакустических навигационных систем (ГАНС), а также автономных подводных аппаратов (АПА) и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА).

Для проведения таких изысканий требуется разрабатывать специальные исследовательские комплексы. Особенностью проведения таких работ в Черном море является наличие больших глубин. Схема предполагаемого маршрута для прокладки трубопровода представлена на рис. 1 [3]. Для снижения рисков при строительстве и эксплуатации трубопровода, а также с учетом ограничений для изменения маршрута был принят вариант перемещения опасных объектов на безопасное расстояние. Основная сложность при перемещении ВОП связана с глубиной их расположения — свыше 1000 м. По имеющейся информации, проекты по перемещению ВОП на таких глубинах никогда не осуществлялись и методики для такого рода работ не разрабатывались.

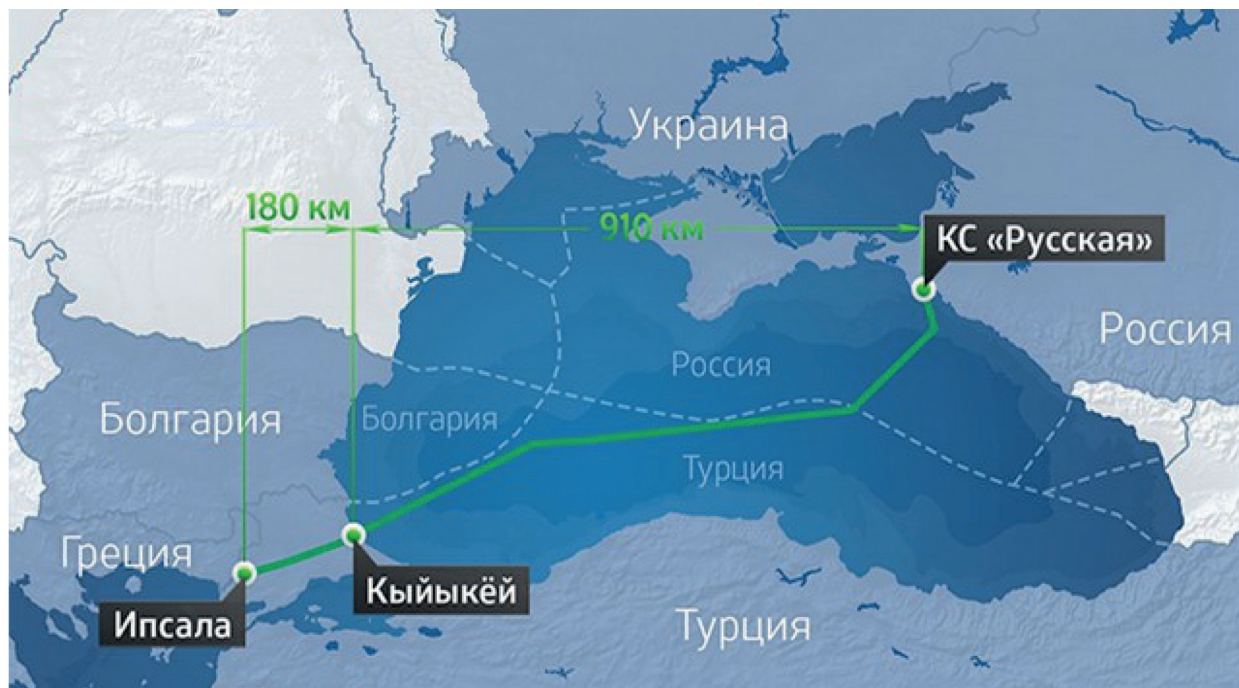


Рис. 1. Схема запланированного трубопровода

Для проведения изысканий по трассе трубопровода российскими специалистами было разработано два комплекса: первый — для проведения съемки рельефа дна способом площадного обследования, второй — для поиска и перемещения обнаруженных ВОП. Причем оба комплекса находились на одном судне, оснащенной системой динамического позиционирования.

Для получения детальной информации о микрорельефе дна работы проводились в два этапа. Первым этапом явилось проведение съемки рельефа дна на глубоководной части трассы (более 200 м), где в качестве носителя необходимой аппаратуры служил АПА. Вторым этапом проходил при съемке рельефа мелководной части трассы (до 200 м), при этом аппаратура устанавливалась на судно.

Надводная часть включает электронную гидрографическую информационную систему (ЭГИС) QINSy фирмы QPS (Quality Positioning Services) с необходимым набором периферийного оборудования, представленного в виде систем позиционирования ГНСС (CNav-3050), датчика перемещения MRU 5+ (Kongsberg), инерциальной системы INS Hydrins (iXBlue) и запасной системы OCTANS (iXBlue). Площадная съемка рельефа дна мелководной части выполнялась при помощи МЛЭ SaeBat7125, регистрация и обработка данных осуществлялась посредством ЭГИС QINSy.

Подводная часть комплекса включает АПА HUGIN 4500 (Kongsberg), приведенный на рис. 2. При изысканиях такого рода целесообразно в качестве носителя датчиков использовать АПА: для сбора батиметрии — МЛЭ EM 2040 («Kongsberg»), для навигации — собственную

инерциальную систему аппарата, доплеровский лаг, а также маяк-ответчик ГАНС «Ніпар 501» (Kongsberg). Посредством ГАНС вычислялись пространственные координаты АПА. Высотное положение АПА определялось при помощи двух независимых систем. В качестве основной системы использовалась ГАНС с ультракороткой базой (УКБ) «Ніпар 501», резервной системой являлся сенсор давления на АПА. Запрограммированный сенсор, измеряющий давление по приведенной формуле, способен осуществлять пересчет давления в значения глубины [4]:

$$Z_s(p, \Phi) = 9,72659 \cdot 10^2 p - 2,512 \cdot 10^{-1} p^2 + 2,279 \cdot 10^{-4} p^3 - 1,82 \cdot 10^{-7} p^4 / (g(\Phi) + 1,092 \cdot 10^{-4} p),$$

где $g(\Phi) = 9,780318(1 + 5,2788 \cdot 10^{-3} \sin^2 \Phi + 2,36 \cdot 10^{-5} \sin^4 \Phi)$;

Z — глубина, м;

p — давление, МПа;

Φ — широта.

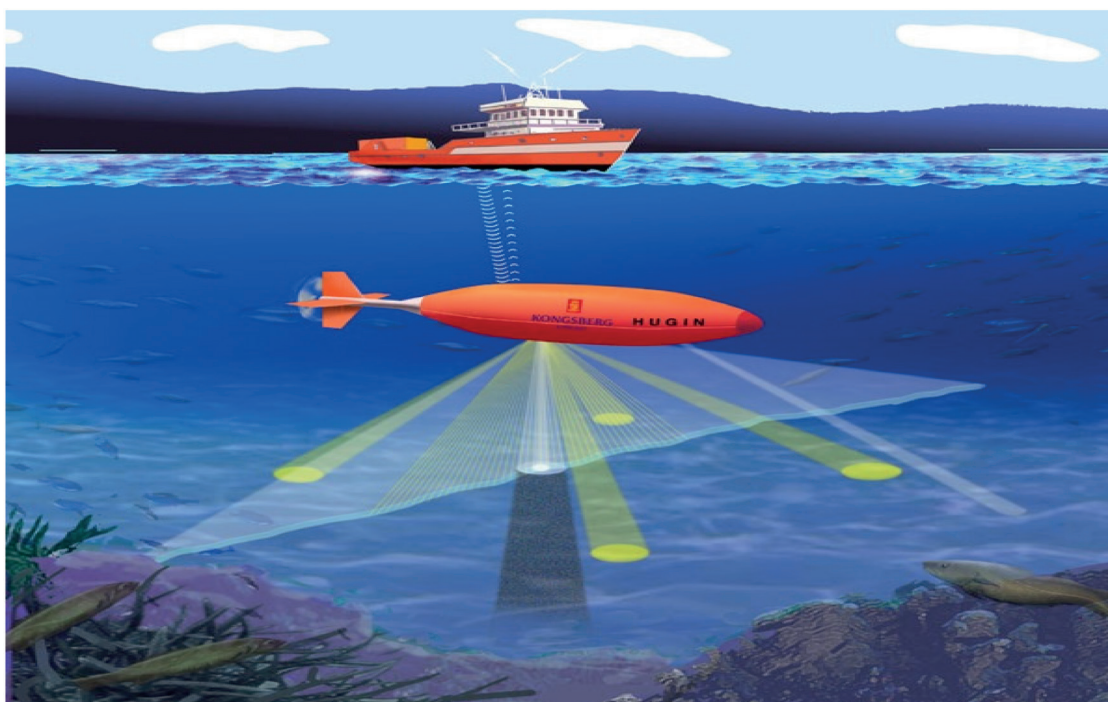


Рис. 2. АПА «Kongsberg HUGIN 4500» (Kongsberg)

ГАНС «Ніпар 501», которая состоит из акустического преобразователя, установленного на судне, и специальных маяков-ответчиков, способна работать в режиме «dualhead», обеспечивающем повышенную точность. Учитывая расстояние между принимающими чувствительными элементами, система повышает качество определения координат АПА в несколько раз. Маяки могут работать в трех режимах: в первом режиме — маяк-ответчик, во втором режиме — непрерывный излучатель, в третьем режиме — посредством электрического возбуждения.

Маяк-ответчик — преобразователь на судне, излучающий направленный акустический импульс, который достигая маяка, служит запускающим сигналом к излучению, маяк генерирует акустическую посылку, которую фиксирует судовая гидроакустическая антенна. Ввиду расширения диаграммы направленности и продолжительного распространения сигнала данный способ предназначен для небольших наклонных дальностей.

Непрерывный излучатель — маяк-ответчик постоянно излучает посылки, а судовая гидроакустическая антенна работает в режиме приема, регистрируя излученные маяком сигналы. Этот способ повышает подробность данных.

При работе в третьем режиме, т. е. посредством электрического возбуждения, судовая система посылает по кабелю электрический импульс, который достигая маяка, возбуждает преоб-

разователь, посылающий акустический сигнал. Ввиду того, что время излучения известно с большой точностью, повышается и точность позиционирования. Кроме того, при таком режиме велика вероятность увеличения количества посылок в единицу времени. Этот способ является наиболее подробным и дает детальные данные о позиции объекта, но требует кабельной связи аппарата с судном, следовательно, подходит только для НТПА, который входит в состав комплекса по поиску ВОП [5].

В отличие от традиционной гидрографии, современная инженерная гидрографии требует получения детальной информации о рельефе на больших глубинах. Для обеспечения детальной съемки рельефа с высоким разрешением (микрорельеф) необходимо сократить расстояния между антеннами МЛЭ и дном. Таким образом, площадь пятен облучения и расстояние между ними были уменьшены в разы и, следовательно, увеличена детальность съемки рельефа.

Существует два варианта распределения лучей: *эквидистантное* (лучи располагаются равномерно, через равную дистанцию) и *равноугольное* (лучи располагаются ближе к центру сектора обзора, между лучами равные углы). Во время сбора данных использовалось эквидистантное распространение лучей, при котором обеспечивается равномерное покрытие дна [6]. Пример цифровой модели рельефа дна приведен на рис. 3.

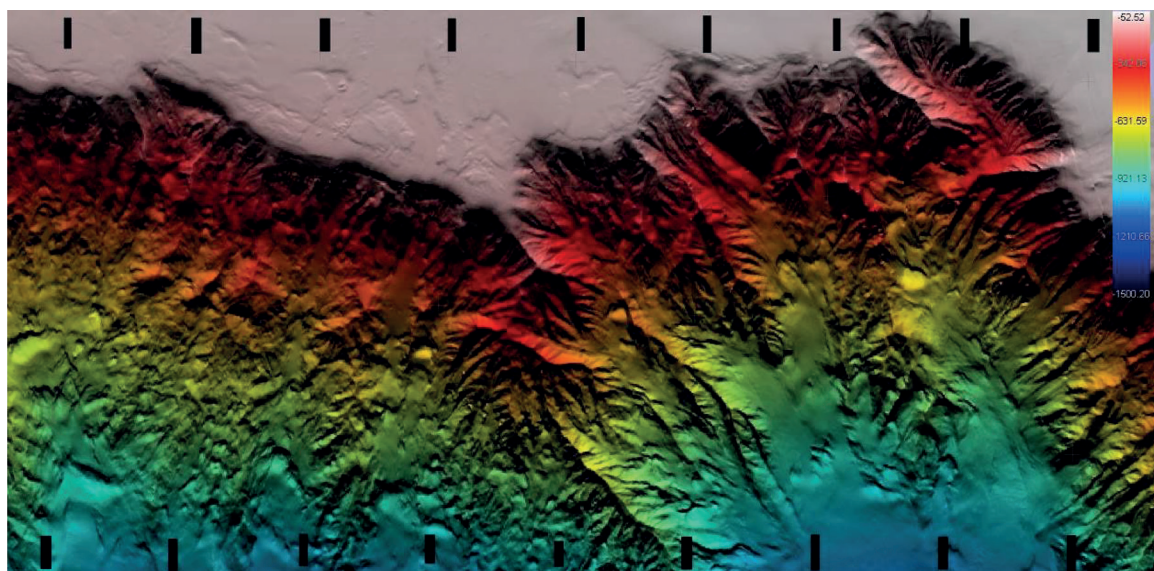


Рис. 3. Цифровая модель — склон континентального шельфа РФ в районе трассы трубопровода.
Масштаб 1:30000

При сокращении расстояния между дном и гидроакустическими антеннами МЛЭ увеличивается заглубление аппарата. На больших глубинах особенно остро встает вопрос о позиционировании аппарата носителя. Фирма «Kongsberg Maritime» нашла способ решить эту проблему, установив на АПА HUGIN 4500 автоматизированную инерциальную систему (ИНС) навигации (INSHUGIN NavP). ИНС состоит из датчика динамических перемещений (IMU), доплеровского лага с четырьмя излучателями для измерения продольной и поперечной составляющей скорости (DVL) и системы курсоуказания, работа которой основана на эффекте Саньяка. Также на аппарате имеется встроенная GNSS-система, но ее работа требует нахождения аппарата на поверхности для связи со спутниками. Данные навигации проходят через фильтр Калмана, что обеспечивает более высокую производительность и точность системы навигации.

При проведении работ возможно появление погрешностей, как при гидроакустическом позиционировании, так и при спутниковом (в GNSS-системе), в таком случае фильтр способен их исключить. Несмотря на достаточную надежность системы, требуется своевременное обновление позиции посредством акустического канала связи для уточнения позиции [7]. Система навигации аппарата оснащена опцией, способной принимать обновления положения с нескольких

транспондеров. Для более точного и стабильного определения позиции требуется несколько таких сенсоров. Эта функция называется NavP UTP. Точность позиционирования зависит от частоты обновления позиции акустическим методом, а также качества работы акустического лага и датчиков курсоуказания. При отсутствии уточнения позиции по акустическому каналу точность позиции равна 0,25 % от пройденного, без уточнения позиции расстояния.

После извлечения данных из АПА вначале следует проверить и отредактировать навигацию. Набор программного обеспечения для постобработки зависит от желаний пользователя. В случае, если пользователь не имеет продуктов для редактирования данных, компания «Kongsberg Maritime» предлагает программу HUGIN Post-Mission Analysis system (PMA). Возможности этой программы обширны. К ним относятся редактирование навигации (для повышения точности позиционирования), обработка, визуализация и контроль качества батиметрии, обработка данных ГБО, опции автоматического распознавания целей для ускорения процесса обработки. Постобработка данных, полученных при помощи АП, представляет собой трудоемкий и обширный процесс, анализ которого выходит за рамки данной статьи.

В последнее время исследовательская гидроакустическая аппаратура получила стремительное развитие. Современные МЛЭ способны создавать все более узкие лучи, а также формировать информацию об интенсивности эхо-сигнала в отдельном пятне облучения. Появилась технология акустического анализа объектов в водной толще, увеличивая тем самым подробность съемки объектов на поверхности и вблизи дна. Использование новых гидроакустических технологий ведет к значительному увеличению потоков регистрируемой информации и дает стимул к развитию гидрографических компьютерных систем, программ регистрации и обработки данных.

Существует ряд компаний, выпускающих программное обеспечение для реализации ранее указанных задач. Одной из таких компаний, систематически выпускающей обновленные и все более совершенные версии гидрографического программного обеспечения для сбора и обработки данных, является фирма QPS (<http://www.qps.nl/>), продуктом которой служат пакеты QINSy\Qimera\Fledermaus. ЭГИС QINSy способна справляться с большим потоком информации, обеспечивать качественную обработку материалов съемки и высокий уровень оценки качества результатов.

Во время изысканий на глубоководном (более 200 м) участке строительства трубопровода данные батиметрии с сенсоров, установленных на АПА, обрабатывались при помощи ЭГИС QINSy. Также при помощи этой программы осуществлялось позиционирование аппарата. Кроме того, в данной программе имеется несколько модулей контроля собранных данных в режиме онлайн, например, «Sounding Grid Utility» (при сборе батиметрии судном), и программных модулей постобработки: Analyze, Validator, Qloud, Fledermaus и др.

В программе «Sounding Grid Utility» выполняется оперативный анализ цифровой модели рельефа. Как видно из верхней части рис. 4, профиль, проведенный на цифровой модели рельефа дна перпендикулярно движению ТПА, при сборе данных не имеет разрывов и пропуска данных. В нижней части рис. 4 (слева) приведены данные контроля качества площадной съемки в виде погрешностей глубин в ячейке регулярной сетки (грида) с 95 %-м уровнем доверительной вероятности (SD 95 %) [8]. В зависимости от величины угла наклона дна и его расчлененности подбирается определенная размерность грида. При резком уклоне в большую по размеру ячейку могут попадать сильно отличающиеся друг от друга глубины. На участке ровного дна видно, что в каждой ячейке грида преобладают глубины, незначительно отличающиеся друг от друга, что означает отсутствие шумов и выбросов, а также подтверждает стабильную работу систем сбора данных. На рис. 4 (внизу) отчетливо видны полосы, возникшие в процессе съемки ввиду переотражения центрального луча. Для МЛЭ фирмы «Kongsberg» это частое явление. Аналогичные полосы имеют место также при наложении данных двух соседних полос обзора МЛЭ. По результатам съемки видно, что полосы составляют по глубине менее 0,5 м. Это продемонстрировано в верхней части рис. 4, представляющего собой поперечное сечение собранных полос обзора. При глубине 1200 м они составляют величину менее 0,1 % от глубины. В данных SD 95 % эти погрешности не отображаются.

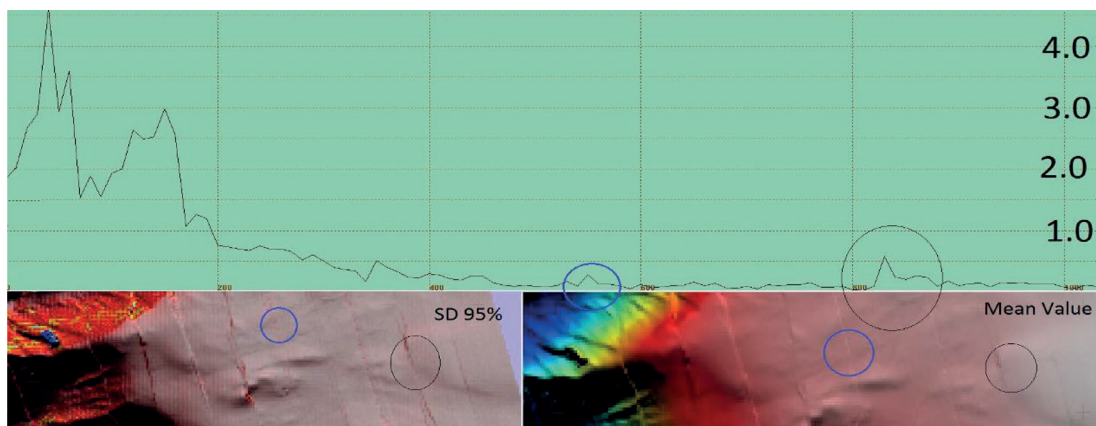


Рис. 4. Пример данных цифровой модели рельефа дна

После проведения съемки рельефа дна по трассе трубопровода наступает третий этап работ, связанный с поиском взрывоопасных объектов, выполняется при помощи второго комплекса, указанного ранее. Второй комплекс для поиска взрывоопасных предметов в качестве подводного носителя использует ТНПА с необходимым набором датчиков.

Обследование при помощи одного прибора не даст надежной и достоверной информации. Поэтому рекомендуется использовать системы, имеющие разные принципы работы, что и было реализовано путем установки на ТНПА гидролокатора бокового обзора (ГБО) Edgetech 2200 м, способного дать детальное сонарное изображение ввиду узкого луча при работе на высокой частоте 1600 кГц, совместно с градиентометром Innovatum Smartsearch, предоставляющим надежную информацию о магнитных полях, вперёдсмотрящим сонаром Kongsberg M3 Sonar System, который выполняет задачи по безопасному продвижению аппарата и обнаружению выдающихся объектов, не освященных ГБО, системой видеокамер, способных работать на больших глубинах, и лазерных систем для определения размеров объекта. Такой комплекс создает условия для получения объективной картины о состоянии морского дна и объектах на нем.

При работе вперёдсмотрящего сонара распространение лучей происходит под небольшими углами в направлении движения. Следовательно, при его использовании будут четко видны объекты, имеющие значительную площадь в направлении, поперечном движению [9]. На сонограмме ГБО лучше заметны стороны объектов с площадью в направлении, продольном движению. Таким образом совместное использование этих приборов дает детальное изображение выступающих объектов на поверхности морского дна. Бывают случаи, когда взрывоопасный объект находится между камнями или за скальным выступом (рис. 5). При этом ГБО не сможет обнаружить эту цель, так как при прохождении с одной стороны на сонограмме засветка будет отображать объект, полностью закрывающий мину, а при съемке с другой стороны часть мины будет закрыта мелкими камнями, что не даст точного представления о цели, а сразу за объектом появляется скала, которая тоже отобразится на сонограмме и сольется с изображением мины в виде области высокой интенсивности [10].

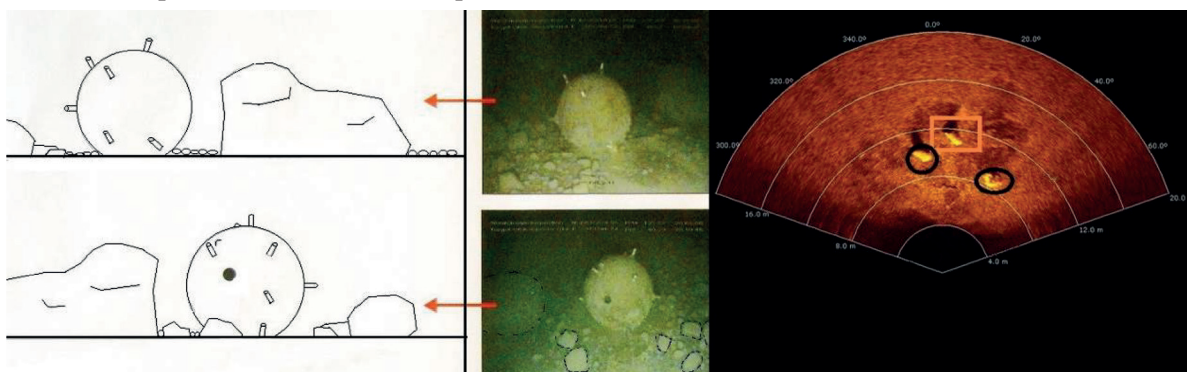


Рис. 5. Мина, скрытая за камнем (изображение, переданное с ТНПА)

В подобных случаях очень важно иметь дополнительные источники информации. Так, например, магнитометр даст данные о магнитном поле [11], на видеокамере можно визуально осмотреть цель, а впередсмотрящий сонар, лучи которого распространяются под небольшим углом к направлению движения, покажет засветку на сонограмме (рис. 5).

Рекомендуется использование ГБО с двумя частотами, что позволит собрать более качественные данные в местах сильного замутнения воды и сделать более точное заключение о преобладающих грунтах. Но даже при наличии хорошего комплекса для сбора данных, в котором системы взаимозаменяемы, необходимо правильно планировать линии, по которым будет проводиться поиск. Если поверхность дна в районе исследований расчлененная, то стоит проводить изыскания вдоль склона, а не поперек, что даст возможность для выявления отдельных объектов и обеспечит хороший уровень качества данных. На рис. 6 представлен объект, расположенный в дюнах. При съемке МЛЭ поперек дюн этот объект не был выявлен ввиду резкого перепада глубин, при съемке вдоль дюн (вдоль изобат) объект отлично виден, так как съемка проводилась при постоянном наклоне дна, и система сразу выявила выдающийся объект (он был освещен несколькими лучами МЛЭ). Выдающийся объект — это тестовая марка с размерами основания $0,4 \times 0,4$ м и $0,3$ м в высоту, изготовленная из металла.

На рис. 6, а приведена цифровая модель рельефа дна, созданная в программе QINSy при помощи утилиты SoundingGrid (2D-режим). На ней хорошо виден объект. На рис. 6, б изображен фрагмент мозаики, полученной с использованием опции ГБО многолучевого эхолота (backscatter). Здесь видна область, хорошо отражающая акустические сигналы, это и есть тестовая металлическая марка. Вокруг нее преобладают мягкие грунты, поглощающие акустическую энергию, следовательно, отраженная интенсивность в таких областях мала. Металл, напротив, почти не поглощает энергию (на сонограмме видна засветка) [12]. В отличие от классического ГБО, данные backscatter имеют точную привязку по координатам, что можно использовать при поиске объектов. На рис. 6, в приведены обработанные данные трехмерного изображения рельефа из программы Qcloud (фирмы QPS). Эта программа имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартной утилитой для обработки батиметрии «Validator».

В программе «Qcloud» существует возможность создания 3D-изображений рельефа на основе цифровой модели, выполненной на основе треугольной нерегулярной сети (TIN), что удобно при обработке «сложных данных» (основания платформ, места с резкими перепадами глубин и сильно выдающимися предметами). Рабочая область состоит из нескольких окон: окно вид сверху — в нем можно отобразить запланированные линии и выбрать данные для редактирования; окно вида Profile, в котором осуществляется обработка; окно 3D вида, где в режиме реального времени отображаются все изменения.

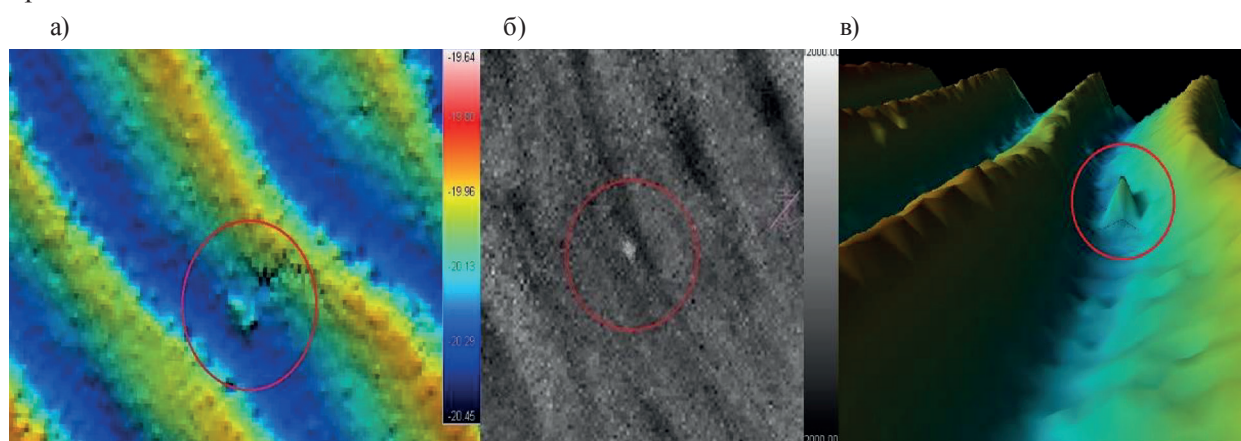


Рис. 6. Тестовая марка, расположенная в дюнах (ЭГИС QINSy\Qcloud):
а — цифровая модель рельефа дна; б — фрагмент мозаики ГБО;
в — трехмерное изображение рельефа Qcloud

При наличии данных о магнитном поле и интенсивности обратного рассеяния можно сделать вывод о качественном составе объекта, а также определить его относительные размеры. После этого, сравнивая полученные данные с видеофайлами, необходимо предоставить заключение по объекту. Таким образом, качество (точность и надежность) проведения работ увеличивается в разы. В случае, если взрывоопасный объект (мина, торпеда и т. д.) находится под слоем грунта, его можно обнаружить при помощи магнитометра / градиентометра [13].

При работе с системой магнитометров необходимо правильно осуществить настройку прибора. Перед спуском нужно осуществить калибровку приборов и проверить надежность крепления [14]. Всей системе магнитометров необходимо задать оптимальные настройки и проверить работу сенсоров. Для этого показания приборов сбрасываются, устанавливается так называемый *нуль*. В момент установки нуля необходимо убрать металлические предметы от приборов (даже железная вставка в носу защитной обуви может создать магнитное поле, ввиду которого показания прибора будут содержать систематическую ошибку). Данные магнитного поля чрезвычайно важны в подобных операциях. При большом количестве взвеси в системе видеообследования не будет видно практически ничего, а на сонарах появится большое количество помех, в таком случае данные градиентометра будут крайне необходимы. Основная часть исследования заключается в определении положения металлических объектов, схожих с минами. Формы аномалий обусловлены остаточной намагниченностью объектов.

В данном исследовании могут наблюдаться три типа аномалий:

- 1) главный положительный максимум;
- 2) главный отрицательный максимум;
- 3) смена положительного максимума на отрицательный.

Позиция объекта в таком случае определяется в точке максимума / минимума для типов 1 и 2 и как средняя между максимумом и минимумом точка для типа 3 [15]. Аномалия должна быть в 2 – 3 раза больше средней квадратической ошибки съемки. По результатам собранных данных можно сделать заключение о форме, размере, глубине залегания и другим параметрам объекта.

Земля, как космическое тело определенного внутреннего строения генерирует постоянное магнитное поле, называемое *нормальным*, или *первичным* [16]. Многие объекты, такие как ВОП, способны создавать аномальные или вторичные магнитные поля. Если исследуемая площадь невелика (несколько десятков квадратных километров), то нормальное поле можно считать постоянным и равным полю на исходной точке (оно принимается за условный нуль). При больших площадях исследования следует учитывать изменение нормального магнитного поля Земли или разбить галсы на участки по 10 – 20 км. Особенно заметно изменение магнитного поля при движении на полюс или экватор.

С целью повышения надежности съемки следует устанавливать стационарные магнитные вариационные станции для регистрации напряженности магнитного поля. Зная время, амплитуду вариаций и время замеров при съемке, можно ввести поправки и более точно рассчитать аномалии во всех пунктах [16]. Пример обработанных данных магнитного поля приведен на рис. 7.

Для точного позиционирования на ТНПА необходимо установить на него инерциальную систему, особенностью которой является работа под водой и на больших глубинах [17]. Такая система может состоять из блока управления и вычисления, в который поступают данные из доплеровского лага, и четырех излучателей для измерения скорости продольного и поперечного движения с целью вычисления истинной скорости относительно грунта, оптоволоконного гироскопа, датчика перемещения и данные позиции, передаваемые с судна, что и было реализовано в процессе изысканий. В качестве инерциальной системы использовалась INSROVINS (iXBlue), способная работать на глубине до 3000 м. Таким образом, получив координаты с судна, учитывая скорость перемещения, курс, углы крена, дифферента и рыскания, система будет определять позицию чаще, чем получать координаты, вычисленные судовой ГАНС. Еще одним достоинством такой системы является повышенная точность.

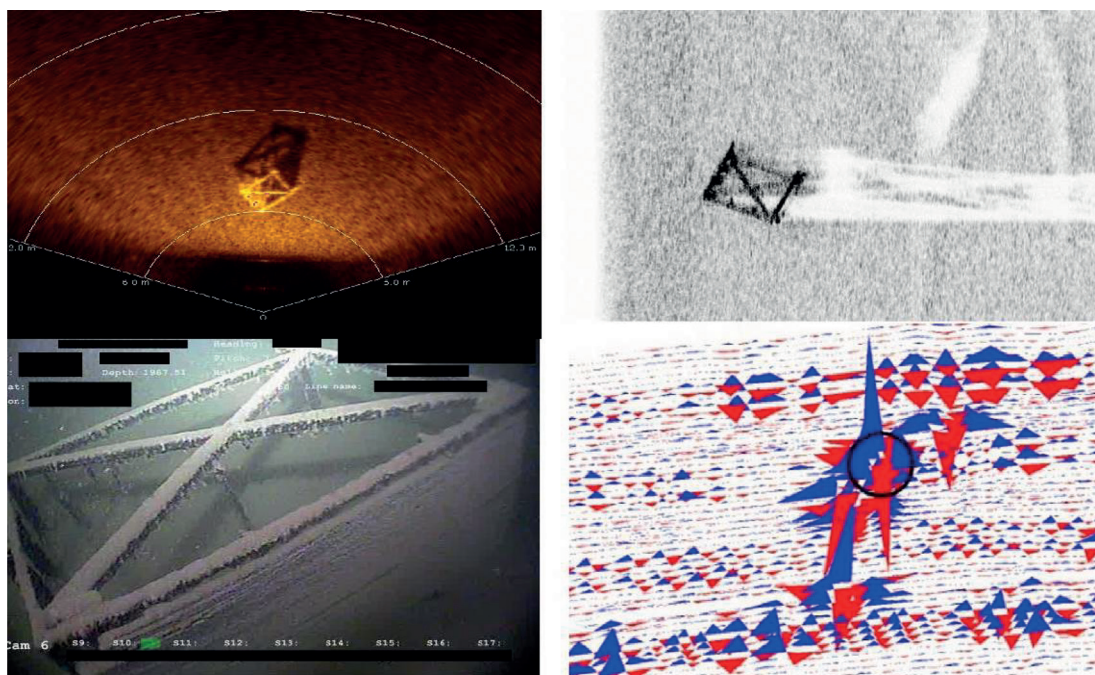


Рис. 7. Пример визуализации данных впередсмотрящего сонара, видеосистемы, ГБО и магнитных аномалий градиентометра донного объекта

Связь ТНПА с судном осуществляется при помощи оптоволоконного кабеля. Основное достоинство этого соединения — большая пропускная способность, небольшие размеры, малый вес, но есть один недостаток — хрупкость. Кабель с судна на ТНПА соединяется с распределительным блоком. К этому блоку подключаются все сенсоры, каждый в отдельный выделенный канал. На судне другой конец оптоволоконного кабеля присоединяется к специальному блоку, который считывает информацию, преобразуя ее в нужные форматы для дальнейшего пользования. Этот блок способен осуществлять трансляцию, используя последовательный интерфейс (COM-порты) или интернет-соединения.

Во время мобилизации следует проверить несколько режимов работ. Так, в случае передачи информации о глубине с сенсора давления, от инерциальной системы, системы видео наблюдения, магнитометров, а также впередсмотрящего сонара, ГБО система работала без больших задержек, однако, только если на ГБО использовались низкие частоты (редкие послышки акустического импульса). При увеличении частоты посылок ГБО поток данных увеличивается и судовая система распределения может не справиться с обработкой данных, из-за чего появятся нежелательные задержки. При присоединении кабелей особое внимание должно уделяться их крепежу. Соединения должны быть смазаны специальным составом, который не даст проникнуть воде в места контактов [18].

Поиск объектов следует проводить по заранее запланированным линиям. После обнаружения потенциального ВОП необходимо провести дополнительные исследования, обработать результаты измерений, оценить вероятность того, что найденный объект может быть ВОП. После этого следует спланировать линии для его детального обследования и оценить территорию рядом с объектом для посадки ТНПА на поверхность морского дна. Посадка аппарата на необследованную должным образом поверхность морского дна может привести к нежелательным последствиям [19]. Например, если под слоем отложений находится металлическая конструкция, то при посадке на нее существует вероятность повреждения бомбы. Такое действие может привести к взрыву и потере оборудования. По завершении обследования прилегающей к объекту территории аппарат садится на дно, после чего необходимо время для оседания взвеси. При хорошей видимости начинается работа по очистке объекта от слоев грязи, песка и ила при помощи

помпового насоса. Вначале производится грубая очистка поверхности для определения примерных размеров объекта (рис. 8, а), затем — более детальная для оценки состояния взрывоопасного объекта (рис. 8, б).

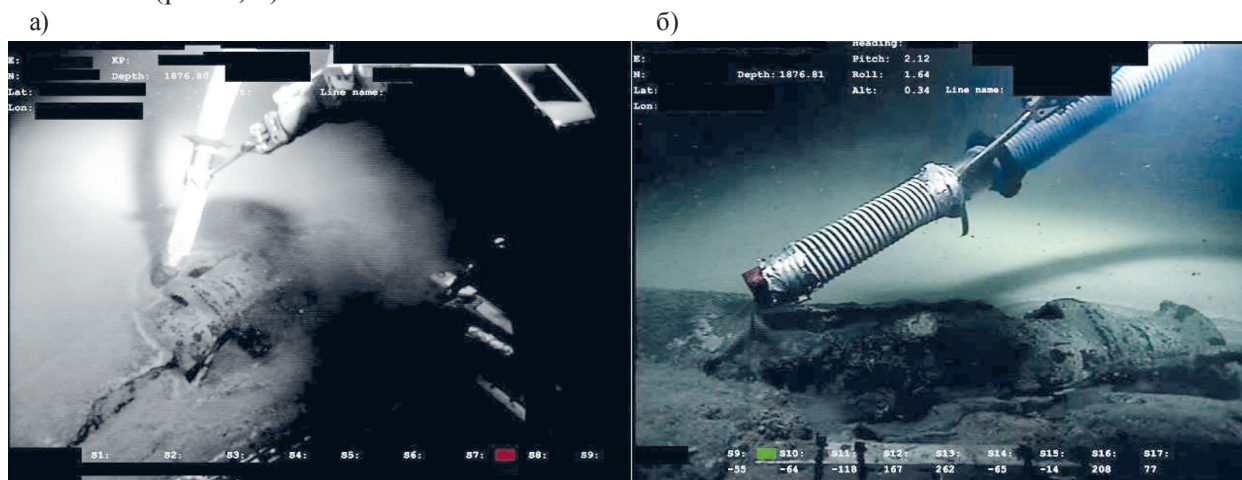


Рис. 8. Очистка затонувшей авиабомбы:

а — грубая очистка для оценки примерных размеров цели,
б — тщательное устранение наносов для оценки состояния объекта

Методы перемещения ВОП

от запланированного трубопровода на безопасное расстояние

Выбор способа зависит от множества факторов, таких как глубина залегания, плотность и состав преобладающих грунтов, состояние и тип ВОП, подводных течений, рельефа дна, возможности использования троса и т. д. В современной практике не существует универсального способа поиска и перемещения таких объектов, в некоторых случаях требуется разработка новых методов.

В период проведения работы было разработано и использовано несколько методов.

1. *Метод с использованием тросов и ТНПА.* Данный метод включает использование насоса для удаления наносов вокруг боеприпаса. Затем ВОП фиксируется тросами. Судно либо ТНПА поднимают боеприпас с морского дна и буксируют его в зону свалки.

2. *Метод «Салазки».* Салазки опускаются на дно с борта судна и размещаются рядом с ВОП при помощи ТНПА. Судно обеспечивает буксировку (волочение) салазок для «захвата» ВОП. Как только ВОП окажется в салазках, судно на безопасном расстоянии отбуксирует салазки к зоне свалки.

3. *Применение грузоподъемного подводного ковша.* Через блок на П-образной раме ковш опускается с борта судна, затем под контролем ТНПА производится его расположение на дне, после чего ТНПА отходит на безопасное расстояние, а судно поднимает ковш и буксирует ВОП в район свалки.

4. *Использование помпового насоса.* Если ВОП находится на границе резкого перепада глубин и в данном районе преобладают мягкие грунты, то при помощи помпового насоса, установленного на ТНПА, осуществляется подмыв со стороны склона, под действием силы тяжести объект скатится в направлении склона. Данный метод исключает использование тросов и салазок, что может сократить время и существенно облегчить операцию.

5. *Использование специального контейнера.* При нахождении ВОП на мягких грунтах возможно использование метода, при котором объект помещается в специальный контейнер. Такой контейнер должен иметь гидравлический, электрический или механический привод для воздействия на механизмы закрытия. При использовании гидравлической системы подача гидравлической смеси происходит посредством ТНПА. Электрический привод наиболее удобный, но требует протяжки кабеля с судна, что не всегда осуществимо. Механический привод с пружинным фикс-

сатором (задачей ТНПА является воздействие на спусковое устройство), при неудаче контейнер придется поднимать на борт судна для повторной подготовки механизма закрытия. Контейнер устанавливается с судна под контролем ТНПА над взрывоопасным объектом, после чего контейнер закрывается, захватывая ВОП и часть грунта.

Выводы

1. Гидрографическое обеспечение строительства подводных трубопроводов является наиболее сложным видом инженерных гидрографических работ. Отечественными специалистами освоены современные сложные программно-технические средства и разработан комплекс для проведения изысканий высокой точности на больших глубинах (более 200 м), что является инженерными гидрографическими работами высокой сложности. Для обеспечения высокой точности разработан комплекс позиционирования, которому стоит уделять большое внимание. Показано, что применение инерциальных систем зависит от поддержки гидроакустического позиционирования при выполнении комплексных работ на больших глубинах.

2. На втором этапе работ для получения детальной информации о рельефе морского дна (микрорельефе) по трассе трубопровода на глубинах более 200 м необходимо использование АПА с МЛЭ. Такая схема работ позволяет не только получить детальную информацию о рельефе, но и обеспечить высокую производительность работ. На третьем этапе работ выполняется уточнение трассы трубопровода, а также обнаружение и устранение взрывоопасных объектов. Для каждого конкретного случая обнаружения ВОП существуют специальный метод его безопасной транспортировки, описанный в статье.

3. Анализ систем показал, что в комплексе с гидроакустической аппаратурой необходимо применять современную систему «магнитометр-градиентометра» для регистрации данных, позволяющих обнаружить погруженные в грунт объекты, дать оценку размеров, состава и состояния.

4. Для более детального изображения морского дна рекомендуется использовать систему сонаров (бокового обзора и вперед смотрящего). Во многих современных МЛЭ имеется опция регистрации интенсивности обратного рассеяния. При поиске ВОП получение такой информации наряду с изображением цифровой модели рельефа следует рекомендовать как обязательное. В отличие от классического буксируемого ГБО такое акустическое изображение дна дает точную плановую привязку объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эдер Л. В. Современное состояние нефтяной промышленности России / Л. В. Эдер, И. В. Филимонова, В. Ю. Немов // Бурение и нефть. — 2013. — № 5. — С. 8–13.
2. Газпром. Ведомственные нормы проектирования и строительства морского газопровода. ВН 39-1.9-005-98. — М., 1998. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.znaytovar.ru/gost/2/VN_391900598_Normy_proektirova.html (дата обращения — 10.10.2015)
3. Вести экономика. «Сможет ли Турция стать новой Украиной для Европы?» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.vestifinance.ru/articles/53282> (дата обращения — 15.12.2015).
4. Etter P. C. Underwater Acoustic Modeling and Simulation, Fourth Edition / P. C. Etter. — CRC Press, 2013. — 195–238 p. DOI: 10.1201/b13906-7.
5. Kongsberg Maritime. Product description. HiPAP High precision Acoustic Positioning Model 501/451/351/101. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/B5F6D93EC6422B5AC1257428002A2C20/\\$file/317748_hipap_product_description.pdf?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/B5F6D93EC6422B5AC1257428002A2C20/$file/317748_hipap_product_description.pdf?OpenElement) (дата обращения — 01.12.2015).
6. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидроакустических сонаров / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-История, 2010. — 348 с.
7. Mandt M., Gade K., Jalving B. Integrating DGPS-USBL position measurements with inertial navigation in the HUGIN 3000 AUV / M. Mandt, K. Gade, B. Jalving // Proceedings of the 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, Russia. — 2001.

8. «QINSy quick». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.geotechsystem.com/upload/1275898933_Quickstart+V+8.0+UK+20060329+.pdf (дата обращения — 28.11.2015).
9. Kongsberg Maritime. «Shallow-water maritime security sonar system». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/ADF45E1497767E90C1257D9A002A2E4/\\$file/M3-MARSEC-Application-Note.pdf?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/ADF45E1497767E90C1257D9A002A2E4/$file/M3-MARSEC-Application-Note.pdf?OpenElement) (дата обращения 23.11.2015).
10. Wilson M. F. J. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope / M. F. J. Wilson, B. O'Connell, C. Brown, J. C. Guinan, A. J. Grehan // *Marine Geodesy*. — 2007. — Vol. 30. — №. 1–2. — Pp. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.
11. Дмитриев В. И. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике: справочник геофизика / В. И. Дмитриев. — М: Недра, 1982. — 221 с.
12. Воронин В. А. Использование гидролокатора со сложным сигналом для решения задач прикладной гидроакустики / В. А. Воронин, С. П. Тарасов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. — 2005. — № 2 (46). — С. 65–69.
13. Блох Ю. И. Решение прямых задач гравиразведки и магниторазведки / Ю. И. Блох. — М.: Московская государственная геологоразведочная академия, 1993. — 79 с.
14. Кауфман А. А. Введение в теорию геофизических методов. Ч. 2. Электромагнитные поля. / А. А. Кауфман. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. — 483 с.
15. Блох Ю. И. Количественная интерпретация гравитационных и магнитных аномалий / Ю. И. Блох. — М.: Московская государственная геологоразведочная академия, 1998. — 88 с.
16. Бабаянц П. С. Изучение рельефа поверхности кристаллического фундамента по данным магниторазведки / П. С. Бабаянц, Ю. И. Блох, А. А. Трусков // *Геофизика*. — 2003. — № 4. — С. 37–40.
17. Войтов Д. В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты / Д. В. Войтов. — М.: МОРКНИ-ГА, 2012. — 506 с.
18. Keedwell S. Advancing the art of subsea inspection / S. Keedwell // *Offshore (Tulsa)*. — 2011. — Vol. 71. — No. 4. — Pp. 102–103.
19. Gibson J. M. Communicating quantitative information about unexploded ordnance risks to the public / J. M. Gibson, A. Rowe, E. R. Stone, W. Bruine de Bruin // *Environmental science & technology*. — 2013. — Vol. 47. — No. 9. — Pp. 4004–4013. DOI: 10.1021/es305254j.

MODERN METHODS OF THE SEAFLOOR INVESTIGATIONS FOR THE EXPLOSIVE OBJECTS DETECTION BEFORE THE PIPELINE CONSTRUCTION

The study examines the implementation of the hydrographic, geophysical and oceanographic technologies for the seafloor and subsoil investigations aimed on the explosive object detection along the underwater pipeline route. Modern hydrographic, geophysical and oceanographic equipment provide the possibility for the complex seafloor inspection. Using the “South stream” project as an example the study discuss the experience of hydrographic, geophysical and oceanographic technologies deployment for exploring the sea bottom. The main attention is paid to the reliability and security of the acquired data achieved by using the systems based on the different physical principles. The singularity of this kind of marine research is conditioned by necessity to detect the explosive object in the deep water. Recommendations for the implementation of the multi beam echo sounder, gradiometer, side scan sonar and forward-looking sonar are delivered. The urgency of implementing the inertial navigation system capable for deep water installation as the support for the underwater acoustics navigation system is noted.

Keywords: swath survey, underwater pipeline, hydrographic, geophysical and oceanographic technologies, hydro acoustics methods, bottom pipe, complex seafloor inspection, multi beam echo sounder, gradiometer, side scan sonar, forward looking sonar, ROV, AUV.

REFERENCES

1. Eder, L. V., I. V. Filimonova, and V. Ju. Nemov. “Russian oil industry’s modern status.” *Burenie i nef* 5 (2013): 8–13.
2. Gazprom. Vedomstvennye normy proektirovaniya i stroitelstva morskogo gazoprovoda. M., 1998. WN 39-1.9-005-98. Web. 10 Oct. 2015 <http://www.znaytovar.ru/gost/2/VN_391900598_Normy_proektirova.html>.

3. Vesti jekonomika. «Smozhet li Turcija stat' novoj Ukrainoj dlja Evropy?» Web. 15 Dec. 2015 <<http://www.vestifinance.ru/articles/53282>>.
4. Etter, Paul C. Underwater Acoustic Modeling and Simulation, Fourth Edition. DOI: 10.1201/b13906-7
5. Kongsberg Maritime. Product description. HiPAP High precision Acoustic Positioning Model 501/451/351/101. Web. 01 Dec. 2015 <[http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/B5F6D93EC6422B5AC1257428002A2C20/\\$file/317748_hipap_product_description.pdf?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/B5F6D93EC6422B5AC1257428002A2C20/$file/317748_hipap_product_description.pdf?OpenElement)>.
6. Firsov, Ju. G. *Osnovy gidroakustiki i ispolzovanija gidroakusticheskikh sonarov*. SPb.: Nestor-Istorija, 2010.
7. Mandt, M., K. Gade, and B. Jalving. "Integrating DGPS-USBL position measurements with inertial navigation in the HUGIN 3000 AUV." *Proceedings of the 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. SPb., Russia, 2001.
8. Quickstart v7.5 QINSy User Manual. Web. 28 Nov. 2015 <http://www.geotechsystem.com/upload/1275898933_Quickstart+V+8.0+UK+20060329+.pdf>.
9. Kongsberg Maritime. «Shallow-water maritime security sonar system». Web. 23 Nov. 2015 <[http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/ADF45E1497767E90C1257D9A002A2E40/\\$file/M3-MARSEC-Application-Note.pdf?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/ADF45E1497767E90C1257D9A002A2E40/$file/M3-MARSEC-Application-Note.pdf?OpenElement)>.
10. Wilson, M. F. J., B. O'Connell, C. Brown, J. C. Guinan, and A. J. Grehan. "Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope." *Marine Geodesy* 30.1–2 (2007): 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.
11. Dmitriev, V. I. *Vychislitelnye matematika i tehnika v razvedochnoj geofizike. Spravochnik geofizika*. M.: Nedra, 1982.
12. Voronin, V. A., and S. P. Tarasov. "Ispolzovanie gidrolokatora so slozhnym signalom dlja reshenija zadach prikladnoj gidroakustiki." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2(46) (2005): 65–69.
13. Bloh, Ju. I. *Reshenie prjamyh zadach gravirazvedki i magnitorazvedki*. M.: Moskovskaja Gosudarstvennaja Geologorazvedochnaja Akademija, 1993.
14. Kaufman, A. A. *Vvedenie v teoriju geofizicheskikh metodov. Chast 2. Jelektromagnitnye polja*. M.: OOO "Nedra-Biznescentr", 2000.
15. Bloh, Ju. I. *Kolichestvennaja interpretacija gravitacionnyh i magnitnyh anomalij*. M.: Moskovskaja Gosudarstvennaja Geologorazvedochnaja Akademija, 1998.
16. Babajanc, P. S., Ju. I. Bloh, and A. A. Trusov. "Izuchenie rel'efa poverhnosti kristallicheskogo fundamenta po dannym magnitorazvedki." *Russian Geophysics* 4 (2003): 37–40.
17. Vojtov, D. V. *Teleupravljajemye neobitaemye podvodnye apparaty*. M.: MORKNIGA, 2012.
18. Keedwell, S. "Advancing the art of subsea inspection." *Offshore (Tulsa)* 71.4 (2011): 102–103.
19. Gibson, J. M., A. Rowe, E. R. Stone, and W. Bruine de Bruin. "Communicating quantitative information about unexploded ordnance risks to the public." *Environmental science & technology*. 47.9 (2013): 4004–4013. DOI: 10.1021/es305254j.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барашок Павел Иванович —
инженер-гидрограф.
ЗАО РОМОНА
pbarashok@mail.ru
Фирсов Юрий Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Barashok Pavel Ivanovich —
Engineer-hydrograph
ZAO ROMONA
pbarashok@mail.ru
Firsov Yuriy Georgievich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
gidrograph@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2015 г.

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА НА ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВОРОТ И ЗАТВОРОВ ШЛЮЗОВ

Целью работы является оценка технического состояния металлоконструкций ворот и затворов судоходных шлюзов, подверженных, в процессе эксплуатации, коррозионному изнашиванию. Определены расчетные сечения и действующие нагрузки. Использованы классические методики расчета напряженно-деформированного состояния в упругой зоне и результаты натурных измерений, в том числе ультразвуковой толщинометрии остаточной толщины металла силовых элементов и упругой их деформации. Получены расчетные зависимости, позволяющие оценить изменение напряженно-деформированного состояния силовых элементов металлоконструкций ворот и затворов судоходных шлюзов при различных значениях их коррозионного износа по величине прогиба под напором. Отмечено, что одним из способов повышения надежности и точности оценки напряженно-деформированного состояния элементов расчетными методами может рассматриваться их дублирование результатами непосредственных измерений уровня приложенных напряжений.

Ключевые слова: коррозионный износ, металлоконструкции ворот и затворов, судоходный шлюз, запас прочности, напряженно-деформированное состояние, ригель, жесткость, остаточная толщина, прогиб под напором, срок эксплуатации.

НОРМАТИВНЫМ документом [1] значения предельно-допустимых износов силовых элементов ворот и затворов судоходных шлюзов, как правило, устанавливаются в размере 15 % от проектной толщины. Последняя, во всех случаях не должна быть меньше расчетного значения, обеспечивающего необходимые запасы прочности конструкции [2], [3]. В связи с этим при формальном выполнении требований [1] возможна необоснованная замена конструкций, обладающих достаточными запасами прочности, что может быть подтверждено расчетами напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) наиболее нагруженных участков элементов [4].

В некоторых случаях, например, при недостатке диагностической информации о фактическом коррозионном износе элементов (утонение Δs), имеется потенциальная возможность его оценки по результатам измерений деформации элементов под воздействием штатных нагрузок. В связи с этим необходимо рассмотреть характер зависимостей показателей НДС элементов от степени их коррозионного износа на примере верхних рабочих подъемно-опускных ворот (далее — ПОВ) шлюза № 25 – 26 Балаковского РГСЦ [5].

Схема конструкции двухригельных ПОВ и действующей на них нагрузки приведена на рис. 1.

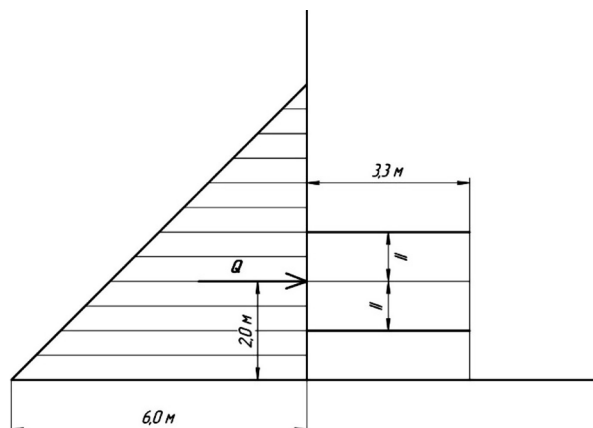


Рис. 1. Схема нагрузок, действующих на двухригельные ворота

Равнодействующая давления воды Q находится на расстоянии 2 м выше уровня бьефа. Ригели расположены на одинаковом расстоянии от равнодействующей давления воды, что обеспечивает равную нагрузку на каждый из них при расчете на прочность и жесткость [6]. Для исследования изменения прочности ПОВ следует учесть влияние обшивки как с напорной, так и безнапорной стороны.

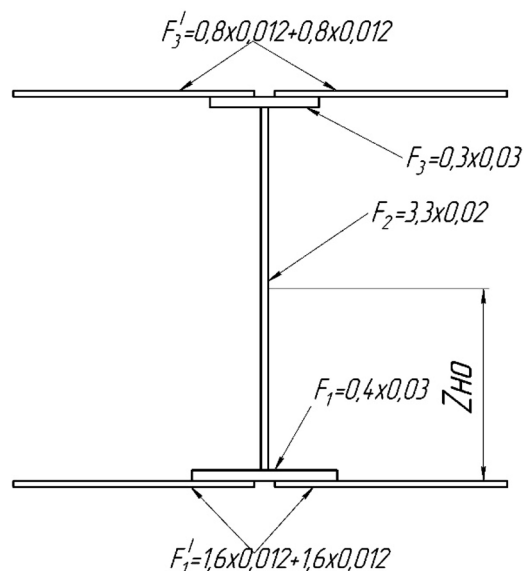


Рис. 2. Сечение нижнего ригеля с присоединенными поясками обшивки

Схема сечения нижнего ригеля с присоединенными поясками обшивки приведена на рис. 2, а расчет геометрических характеристик его поперечного сечения дан в следующей таблице.

Расчетные характеристики поперечного сечения нижнего ригеля

Расчетные характеристики	$F_i, \text{м}^2$	$Z_i, \text{м}$	$S_i, \text{м}^3$	$I_i, \text{м}^4$	$I_{\text{собств}}$
	1	2	3	4	5
F_1'	0,0384	0	0	0	—
F_1	0,012	0	0	0	—
F_2	0,066	1,665	0,110	0,183	0,060
F_3	0,009	3,33	0,030	0,100	—
F_3'	0,029	3,33	0,096	0,319	—
Σ	0,154		0,236	0,662	

Примечания: в графе 1 приведены F_i — площади поперечных сечений частей составного профиля; в графе 2 — Z_i — расстояние от центра тяжести площади F_1 до центра тяжести i -й площади; в графе 3 — $S_i = F_i Z_i$ — статический момент i -й площади относительно оси, проходящей через центр тяжести площади F_1 ; в графе 4 — $I_i = F_i Z_i^2$ — момент инерции i -й площади относительно оси, проходящей через центр тяжести площади F_1 ; в графе 5 — $I_{\text{собств}} = \frac{sh^3}{12}$ — собственный момент инерции, где h — высота элемента.

Если принять допущение о том, что площади каждой составляющей поперечного сечения уменьшаются одинаково, то геометрические характеристики сечения будут уменьшаться пропорционально коэффициенту износа $k_{\text{и}}$, определяемому по формуле

$$k_{\text{и}} = \left(1 - \frac{\Delta S}{S_{\text{пр}}} \right) = \frac{S_{\text{ост}}}{S_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $s_{\text{ост}}$ — остаточная толщина элемента, мм; $s_{\text{пр}}$ — проектная толщина элемента, мм; $\Delta s = s_{\text{пр}} - s_{\text{ост}i}$ — уменьшение толщины составляющей площади сечения ригеля, мм; $\frac{\Delta s_i}{s_{\text{пр}i}}$ — относительный износ каждой из составляющей площади сечения ригеля (для данной задачи принято $\frac{\Delta s_i}{s_{\text{пр}i}} = \text{const}$).

Исходя из полученных данных в таблице, находим:

1) расстояние от оси, проходящей через центр тяжести площади F_1 до оси, проходящей через центр тяжести площади всего сечения

$$Z_{\text{HO}} = \frac{0,236}{0,154} = 1,53 \text{ м};$$

2) момент инерции сечения относительно нейтральной оси:

$$I_{\text{HO}} = 0,662 - 1,53 \cdot 0,154 = 0,426 \text{ м}^4;$$

3) момент сопротивления сечения:

$$W = \frac{I_{\text{HO}}}{3,330 - Z_{\text{HO}}} = \frac{0,426}{3,330 - 1,53} = 0,237 \text{ м}^3;$$

4) максимальный статический момент отсеченной площади:

$$S_x^{\text{max}} = 0,050(3,33 - 1,53) + (3,3 - 1,5)^2 \cdot 0,02 \frac{1}{2} = 0,122 \text{ м}^3.$$

Геометрические характеристики сечения составного профиля в процессе эксплуатации изменяются в зависимости от утончения его элементов. На графиках (рис. 3 и 4) показано изменение момента сопротивления W , максимального статического момента отсеченной площади S_x^{max} и момента инерции I_{HO} в зависимости от срока эксплуатации ворот при постоянной скорости уменьшения толщин элементов 0,05 мм/год и 0,10 мм/год.

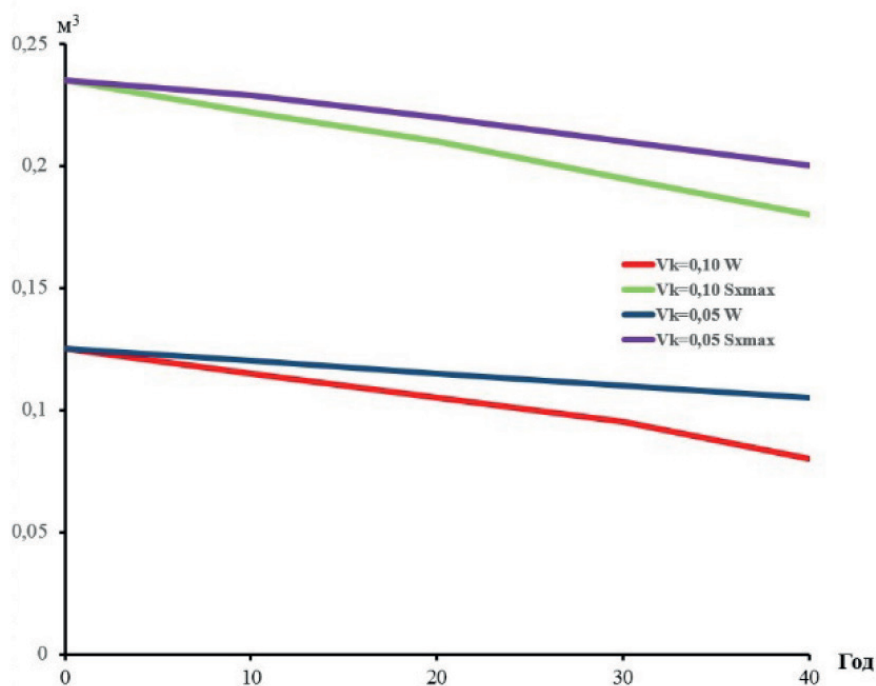


Рис. 3. Уменьшение момента сопротивления W и максимального статического момента S_x^{max} нижнего ригеля от продолжительности эксплуатации ворот

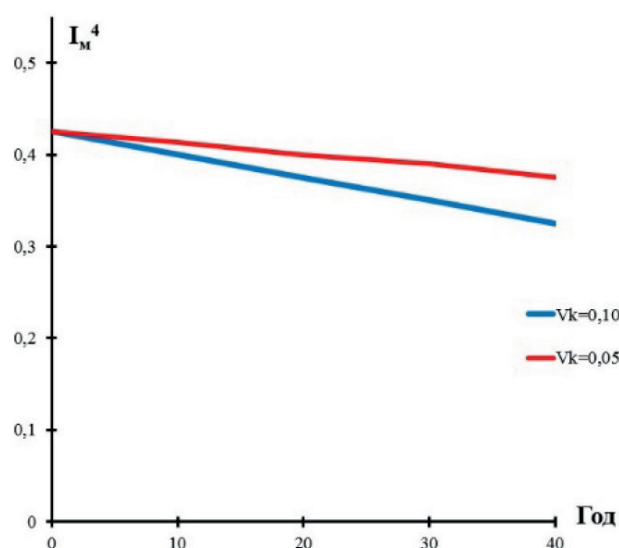


Рис. 4. Уменьшение момента инерции $I_{но}$ площади поперечного сечения нижнего ригеля от продолжительности эксплуатации ворот

Для расчета изменений прочности (максимальных нормальных и касательных напряжений) и жесткости (прогиба середины пролета) нижнего ригеля последний представляется в виде однопролетной балки, свободно опертой по концам и нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q , кН/м [7], величина которой определяется по формуле

$$q = 9,8 \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} H^2, \quad (2)$$

где H — максимальный напор, м ($H = 6,0$ м).

После подстановки получим $q = 88,2$ кН/м. На рис. 5 приведены графики изменения максимальных касательных и нормальных напряжений в процессе эксплуатации.

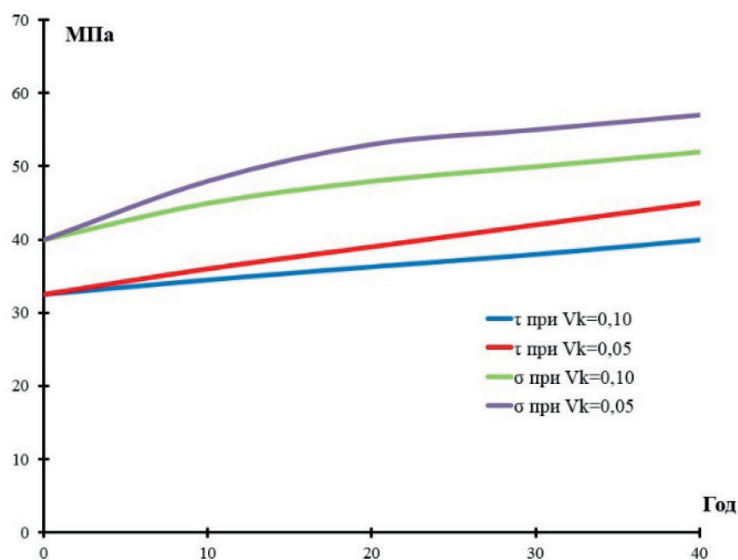


Рис. 5. Изменение касательных и нормальных напряжений

Жесткость ворот можно оценить по величине прогиба ригеля, максимальное значение которого в середине пролета (при $s_{остi} = s_{при}$) составит

$$y\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5}{384} \cdot \frac{qL^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{88,2 \cdot 31,2^4 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0,426} = 0,0127 \text{ м}, \quad (3)$$

где $E = 210^5$ МПа — модуль нормальной упругости стали.

На рис. 6 приведена номограмма, позволяющая определить изменение характеристик прочности и жесткости ворот (нормальные (σ , МПа) и касательные (τ , МПа) напряжения) при гидродинамическом напоре в зависимости от износа элементов ригеля или года эксплуатации при заданной средней скорости изнашивания. Полученные зависимости позволяют также произвести оценку коррозионного износа ригеля ворот по изменению величины прогиба «у» под напором.

Результаты расчетов для аналогичных элементов, выполненных различными авторами [5], в ряде случаев имеют значительные отличия, что связано, как правило, с погрешностью определения характеристик расчетного сечения и степени коррозионного износа. Дополнительные погрешности при оценке НДС вызывают отклонения фактических нагрузок, действующих на элементы, от принятых при расчетах. Повышению точности определения НДС может способствовать применение физических методов контроля, в частности, рассмотренных в работах [8] – [11].

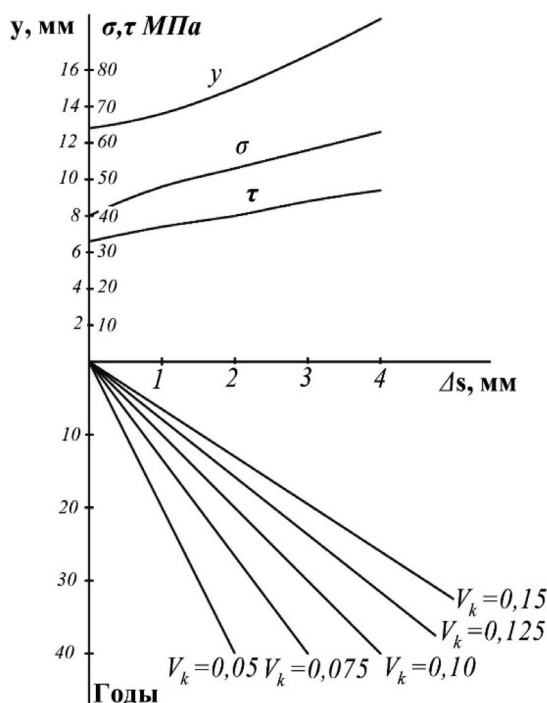


Рис. 6. Номограмма для определения прогиба (y , мм) и максимальных нормальных (σ , МПа) и касательных (τ , МПа) напряжений

Из результатов, проведенных исследований следует:

- полученные расчетные зависимости позволяют оценить изменение НДС силовых элементов металлоконструкций ворот и затворов судоходных шлюзов при различных значениях их коррозионного износа;
- результаты расчетов в целом согласуются с установленными предельно-допустимыми значениями износов и деформаций элементов при рабочих нагрузках;
- точность оценки технического состояния металлоконструкций ворот и затворов зависит от корректности принятых характеристик расчетных сечений, погрешности определения износа элементов и возможностей используемых расчетных методов;
- одним из способов повышения надежности и точности оценки НДС элементов расчетными методами может рассматриваться их дублирование результатами непосредственных измерений уровня приложенных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МУ 050-025-2001 Методические указания. Определение технического состояния металлоконструкций ворот и затворов СГТС. — М.: ФГУП ЦБНТИМТ РФ, 2002. — 86 с.
2. Федеральный закон № 384 от 30.12.2009. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений.
3. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. — Введ. 2012-01-01. — М., 2012. — 40 с.
4. Кузьмицкий М. Л. Исследование возможности и условий развития процесса усталостного разрушения элементов механических систем на этапе образования макротрещин / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонов, И. Н. Базавлук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 68–74.
5. Кузьмицкий М. Л. Проведение расчетных исследований с анализом прочностного состояния и остаточного ресурса металлоконструкций аварийно-ремонтных ворот, верхних рабочих ворот, нижних двустворчатых ворот и ремонтных двустворчатых ворот и затворов водопроводных галерей шлюза № 17–18 Чебоксарского РГСЦ и шлюза № 25–26 Балаковского РГСЦ: Отчет о НИР (заключительный); рук. М. Л. Кузьмицкий / М. Л. Кузьмицкий, В. Б. Чистов, Н. М. Ксенофонов, Ю. А. Киселев, В. М. Рябчук, Д. А. Бордиян. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2014. — 118 с.
6. Полонский Г. А. Механическое оборудование гидротехнических сооружений / Г. А. Полонский. — М.: Энергия, 1974. — 343 с.
7. Беляев Н. М. Соппротивление материалов / Н. М. Беляев. — М.: Наука, 1976. — 607 с.
8. ГОСТ Р 53965-2010. Контроль неразрушающий. Определение механических напряжений. Общие требования и классификация методов. — Введ. 2011-12-01. — М.: Стандартинформ, 2011. — 8 с.
9. Дубов А. А. Новые требования к методам и средствам диагностики напряженно-деформированного состояния материалов / А. А. Дубов // Территория NDT. — 2012. — № 4. — С. 52–56.
10. Берман А. В. Оценка остаточного ресурса металлоконструкций горных машин на основе характеристик несущей способности материала / А. В. Берман, Я. С. Ватукин, С. К. Коровин, К. М. Первов, В. К. Первов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2005. — № 5. — С. 220–228.
11. Никитина Н. Е. Акустоупругость и ее применение для измерения напряжений в крупногабаритных конструкциях / Н. Е. Никитина // Вестник научно-технического развития. — 2009. — № 2. — С. 41–46.

CALCULATED RESEARCH INFLUENCE CORROSIVE WEAR ON STRENGTH METAL CONSTRUCTIONS GATES NAVIGATION LOCK

The aim of the work is to evaluate the technical condition of metal structures gates and gate shipping locks exposed, during operation, corrosion wear. Determine the design section and current load. We use the classical method of calculating the stress-strain state in the elastic region and the results of field measurements, including ultrasonic thickness of the residual metal thickness of power elements and elastic deformation. Calculated according to assess the change in the stress-strain state power components metalwork gates and gate shipping locks at different values of corrosion deterioration of the value of deflection under pressure. It is noted that one way to improve the reliability and accuracy of the assessment of the stress-strain state of the elements of calculation methods may be considered duplication results of direct measurements of the level of the applied voltage.

Keywords: corrosion wear, metal framework gates, navigation lock, a margin of safety, stress-strain state, girder, stiffness, residual thickness, bending under pressure, service life.

REFERENCES

1. Russian Federation. Methodical instructions MU 050-025-2001. Opredelenie tehnikeskogo sostojanija metallokonstrukcij vorot i zatvorov SGTS. M.: FGUP CBNTIMT RF, 2002.
2. Russian Federation. Federal Law № N 384. 30 December 2009. Tehniceskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij.
3. Russian Federation. Rulebook. SP 58.13330.2012. Gidrotehnicheskie sooruzhenija. Osnovnye polozhenija. M., 2012.

4. Kuzmitskiy, M., N. Ksenofontov, and I. Bazavluk. "Research opportunities and conditions for the development of the process of fatigue fracture elements of mechanical systems at the stage of education macrocracks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 68–74.
5. Kuzmickij, M. L., V. B. Chistov, N. M. Ksenofontov, Ju. A. Kiselev, V. M. Rjabchuk, and D. A. Bordijan. *Provedenie raschetnyh issledovaniy analizom prochnostnogo sostojaniya i ostatochnogo resursa metallokonstrukcij avarijno-remontnyh vorot, verkhnih rabochih vorot, nizhnih dvustvorchatyh vorot i remontnyh dvustvorchatyh vorot i zatvorov vodoprovodnyh galerej shljuzha № 17-18 Cheboksarskogo RGSiS i shljuzha №25-26 Balakovskogo RGSiS: Otchet o NIR (zakljuchitel'nyj)*; ruk. Kuz'mickij M.L. SPb.: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova», 2014.
6. Polonskij, G. A. *Mehanicheskoe oborudovanie gidrotehnicheskikh sooruzhenij*. M.: Jenergiya, 1974.
7. Beljaev, N. M. *Soprotivlenie materialov*. M.: Nauka, 1976.
8. Russian Federation. State standard. GOST R 53965-2010. Kontrol nerazrushajushhij. Opredelenie mehanicheskikh naprjazhenij. Obshhie trebovaniya i klassifikacija metodov. M.: Standartinform, 2011.
9. Dubov, A. A. "Novye trebovaniya k metodam i sredstvam diagnostiki naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya materialov." *Territorija NDT* 4 (2012): 52–56.
10. Berman, A. V., Ja.S. Vatuken, S. K. Korovin, K. M. Pervov, and V. K. Pervov. "Ocenka ostatochnogo resursa metallokonstrukcij gornyh mashin na osnove harakteristik nesushhej sposobnosti materiala." *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* 5 (2005): 220–228.
11. Nikitina, N. E. "Akustouprugost i ee primenenie dlja izmerenija naprjazhenij v krupnogabaritnyh konstrukcijah." *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* 2 (2009): 41–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузьмицкий Михаил Леонидович —
 доктор технических наук.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 kuzmitskiymfspbuwc@mail.ru
 Ксенофонтов Николай Михайлович — аспирант.
 Научный руководитель:
 Кузьмицкий Михаил Леонидович.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 ksen_nm@mail.ru
 Чистов Валентин Борисович —
 доктор технических наук, профессор.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 kaf_sopromat@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuzmitskiy Mikhail Leonidovich —
 Dr. of Technical Sciences.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 kuzmitskiymfspbuwc@mail.ru
 Ksenofontov Nikolai Mikhailovich — postgraduate.
 Supervisor:
 Kuzmitskiy Mikhail Leonidovich.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 ksen_nm@mail.ru
 Tchistov Valentin Borisovich —
 Dr. of Technical Sciences, professor.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 kaf_sopromat@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 13 октября 2015 г.

УДК 574, 528.422

Е. Н. Колосков

ВЗАИМОСВЯЗЬ ГИДРОГРАФИИ И ГЕОЭКОЛОГИИ В КОНТЕКСТЕ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ

Рассмотрены вопросы использования гидрографических информационных технологий для исследования микрорельефа арктических морей и дальнейшее обоснование на основе этих данных глобальных климатических изменений. Отмечается, что современная гидроакустическая аппаратура предоставляет

широкие возможности для получения не только детальной топографии дна, но и дополнительной информации, показывающей структуру верхней части разреза донного грунта и наличие объектов в придонной водной толще. При этом возникает возможность не только наблюдать морфологические особенности рельефа, но и получать информацию, открывающую новые перспективы изучения дна средствами гидроакустики в рамках различных направлений морской деятельности, включая морскую экологию. Основное внимание уделено вопросам последствий глобального изменения климата и его влияния на донный грунт. Показано проявление термокарстовых процессов, способных создавать угрозу сохранности трубопроводных магистралей и любых иных подводных коммуникаций. Рассмотрены особенности арктического подводного микрорельефа, включая борозды, оставленные на грунте стамухами, и положительные формы в виде куполообразных возвышений. Такие уникальные формы микрорельефа, обнаруженные недавно с использованием новейших гидроакустических средств, как правило, приурочены к донному газопроявлению в форме метановых факелов от субмаринных газогидратов.

Ключевые слова: гидрографические информационные технологии, геоэкология, морфологические особенности рельефа, арктические моря, термокарстовые процессы, донное газопроявление, субмаринные газогидраты.

В НАСТОЯЩЕЕ время мировым научным сообществом отмечается изменение климата на планете в сторону его потепления. Полагают, что за последние сто лет Земля потеплела на 0,8 °С, причем значительная часть процесса наблюдалось в течение последних трех десятилетий XX в. Анализ долгосрочных климатических рядов выявил наличие заметных климатических изменений в Северо-Западном регионе Российской Федерации. Так, например, в Карелии рост температуры приземного воздушного слоя составил + 0,2 °С за 100 лет (1900 – 2000 гг.). Из них за последние 50 лет этот процесс явно усилился, и данный показатель достиг величины + 0,6 °С. Исследованиями, проведенными в южной части Западной Сибири, в бассейне Верхней Оби, было обнаружено повышение среднегодовых температур воздуха, начиная с середины 30-х гг. XX в. Характерно, что интенсивное потепление происходило именно в зимние периоды, когда средние фиксированные значения температур повысились почти на три градуса [1].

Согласно одной из основных версий, климат планеты в значительной степени зависит от количества в атмосфере свободного углекислого газа. В случае пополнения воздушной среды этим химическим соединением в атмосфере усиливается парниковый эффект. Природный механизм устранения из атмосферы свободного углекислого газа приведен в работе [2]. Находясь в связанном состоянии, углерод становился основополагающим элементом при формировании колоссальных запасов горючих ископаемых и служил главной составной частью карбоната кальция (CaCO_3) — исходного материала для коралловых рифов, атоллов, известковых островов и др. Однако в течение последних десятилетий в атмосфере неожиданно стал наблюдаться процесс обратного характера, когда концентрация свободного CO_2 в воздухе начала заметно возрастать. Большинство специалистов увидели в этом техногенную причину. Действительно, сжигание человеком топлива и горючих материалов вносит ежегодно в атмосферу не менее $1 - 10^{10}$ т углекислого газа, что вызывает *биотехногенный эффект* [2]. Как считают многие исследователи, данная тенденция может оказать влияние на характер земного климата в сторону его потепления.

С экологической точки зрения особую опасность при таянии полярных льдов, как следствии данного процесса, могут представлять разрушения так называемых *клатратов* — кристаллических каркасов во льду, полости которых заполнены молекулами метана (CH_4), относящегося параллельно с CO_2 к категории тепличных газов. По мере предполагаемого таяния высвобождающийся из ледовых полостей метан будет поступать в атмосферу в несоизмеримо более значимых количествах, в отличие от всех искусственных источников, вместе взятых. Кроме того, следствием глобального потепления с большой долей вероятности могут стать изменения в характере рельефа земной поверхности. Особенно это касается высокоширотных районов планеты, скованных с вечной мерзлотой. В пределах акватории арктического шельфа, ещё задолго до публичного обсуждения климатической тематики, регулярно обнаруживались колебания отметок донной поверх-

ности. На морском дне выявлялось повсеместное развитие депрессивных участков. Так, в мелко-водной зоне моря Лаптевых (диапазон глубин 2 – 5 м), к примеру, амплитуды таких деформаций достигали 0,8 м.

Последующий анализ многолетней серии арктических промеров (1923 – 1965 гг.) позволил прийти к выводу о том, что подобные процессы достаточно разнообразны по своим масштабам: в одних точках это малозаметные микроопускания, в других местах — солидные депрессии, измеряемые в длину первыми километрами и сопровождаемые просадками величиной до 4 м [3]. В то время данный феномен вызывал исключительно навигационный интерес, поскольку создавал проблемы, связанные с быстрым «старением» морских навигационных карт арктических морей. Примечательно, что подобные явления наблюдались в районе малой сейсмической активности и с относительно спокойным волновым режимом. Таким образом, сейсмическую составляющую в качестве причин обнаруженной нестабильности правомерно сразу исключить, поскольку рельеф в указанном месте не относится к формам, свойственным сейсмически активным фрагментам земной коры. В тектоническом смысле рассматриваемая геологическая провинция относится к платформенному типу со слабыми (эпейрогеническими) колебаниями земной поверхности. Известно, что в современную эпоху новейшие тектонические процессы в пределах этого региона проявляются в форме плавного опускания земной коры со скоростью, примерно равной 11 мм за столетие. Минусовая направленность эпейрогенического цикла при этом может послужить дополнительным благоприятствующим фактором, поскольку она оказывает влияние на волновую базу, ослабляя воздействие на дно внешних проявлений иного, гидрогенного, свойства. Вместе с тем уровень развития гидрографических технологий того времени не позволял получать детальную площадную информацию о подводном рельефе, дающую возможность надежно отслеживать его динамику и получать надежную количественную информацию.

Отличительной особенностью криолитозоны является сингенетический тип мерзлоты, подразумевающий ритмическое распределение в толще грунта полигонально-жильных льдов (в том числе на морском дне и в устьевых участках северных рек). Однако в грунтовых толщах периодически обнаруживаются цельные линзы погребённого ископаемого льда. В процессе годового хода температур возникает *эффект неравномерного сезонного протаивания отдельных ледовых тел*. Летом, когда прибрежные воды прогреваются до положительных температур по всей водной толще, на границе прогретых вод и мёрзлых пород создаётся высокий температурный градиент, который обуславливает большую теплоотдачу и, как следствие, интенсивное протаивание [4], [5]. Подобные явления сопровождаются поверхностной деформацией рельефа в виде бугров пучения, провалов, западин и аласов (плоских понижений). Скорее всего, температурный фактор и служит в данном случае причиной формирования особого мерзлотного ландшафта, известного как *термокарст*. Процесс этот может быть усилен и даже спровоцирован искусственным путём, когда во время прогонки масс нефтяного субстрата под водой происходит нагрев магистральной трубы, что создаёт *эффект «тёплого крота»*, т. е. её проседания в грунт. Именно мерзлотные деформации служат одной из серьёзных угроз целостности и герметичности трубопроводных ниток и, соответственно, безаварийной работы в момент транспортировки углеводородного сырья. Всё это обуславливает высокую степень эксплуатационного и экологического риска именно в зоне арктического шельфа [6].

В работах [7] – [10] отмечается, что современные средства и методы выполнения гидрографических исследований существенно изменились благодаря внедрению технологии гидроакустических измерений, спутниковых средств позиционирования, портативной вычислительной техники, а также появлению программного обеспечения трехмерной визуализации. Одновременно появление информационных технологий позволило существенно повысить объемы собираемой батиметрической информации.

Ведущей тенденцией в современной морской инженерной гидрографии является применение многолучевых эхолотов (МЛЭ). Появился новый класс мелководных МЛЭ, управляемый сек-

тором излучения [7], [8], работающих на глубине до 150 – 200 м с диапазоном частот 200 – 400 кГц и использующих линейно-частотную модуляцию акустического сигнала.

МЛЭ последнего (пятого) поколения, выпускаемые ведущими зарубежными фирмами, обеспечивают выдачу следующей информации: батиметрические данные (трехмерные координаты точек морского дна), сонарное изображение (информация интенсивности обратного рассеивания), а также изображение объектов в водной толще.

В отличие от ранее использовавшихся методов представления рельефа дна в виде отдельных отметок глубин, получаемых по данным однолучевых эхолотов, при применении МЛЭ объем батиметрической информации получается при использовании этого оборудования настолько, что возникает необходимость применения батиметрических цифровых моделей рельефа дна (ЦМРД). Как известно, реализация ЦМРД возможна на основе регулярных сеток (гридов) и нерегулярных триангуляционных сеток TIN [7]. Применение электронной гидрографической информационной системы (ЭГИС) позволяет собирать и обрабатывать батиметрическую информацию в целях оперативной визуализации ЦМРД. Однако окончательное формирование ЦМРД осуществляется на этапе постобработки.

В мелководном море (глубины до 100 м) современная электронная гидрография обеспечивает возможность получения цифровых моделей подводного рельефа с точностью, соизмеримой с цифровыми моделями суши. При использовании современных МЛЭ возникает возможность наиболее наглядного представления результатов батиметрической съемки. Для традиционной гидрографической деятельности планшеты, как правило, принято готовить в масштабах не крупнее 1:10 000, что вполне удовлетворяет нуждам морской навигации при создании навигационных морских карт. В случае выполнения инженерных задач, доля которых в силу народнохозяйственных и коммерческих запросов в современных условиях постоянно увеличивается, масштабы отчетных планшетов должны быть, наоборот, не менее 1 : 5000. Конечных потребителей чаще всего интересуют именно детали микрорельефа, которые могут быть отображены *исключительно* в крупномасштабном формате. При этом, к сожалению, информация, представляемая в традиционном плоском варианте изображения (2D) плохо воспринимается, порой, даже специалистами. Отсюда использование материалов, наносимых на бумажные или электронные 2D- планшеты, не позволяет наглядно и эффективно решать задачи мониторинга подводного рельефа.

Существуют специальные пакеты программ — 3D-представления результатов гидрографических работ, одной из которых является пакет программ «Fledermause » (фирмы QPS, Голландия) [9]. Изображения в формате 3D обладают детальностью и объёмностью, что позволяет воспринимать изображение форм микрорельефа на уровне опознавания образа и осуществлять оценку тех или иных проявлений на поверхности скрытого под водой ландшафта.

Появление новых возможностей в технологии выполнения гидрографических работ с изображением трёхмерных моделей создаёт благоприятную ситуацию для разработки новых направлений в области природопользования, в том числе геоморфологической направленности. Исключительно важным также является возможность получения 4D-изображений, где дополнительным (четвертым) измерением служит установленная шкала времени.

На рис. 1 приведены цифровые модели дна на бере Обской губы (глубины 13 – 15 м). Представленный материал получен по данным съемки рельефа упомянутых ранее мелководных МЛЭ с частотой акустического сигнала 300 кГц. При анализе этого материала обнаруживаются на дне эрозионные борозды с относительными глубинами в 1 – 2 м. Предположительно они являются результатом *подвижки стамух* (глыб подвижного донного льда), так называемой *экзарации* (от лат. *exaratio* — выпаживание). При внешнем воздействии льда на поверхности дна, состоящей из рыхлых осадочных пород, образуются борозды или штрихи [9]. Здесь речь идёт уже не об указанном ранее температурном факторе, а о причинах *деструктивно-механического* свойства. Данное обстоятельство в плане безопасности требует к себе не меньшего внимания, чем проявления термокарстовых процессов, поскольку оно способно создавать угрозу не только целостности трубопроводных магистралей, но и сохранности любых иных подводных коммуникаций [10].

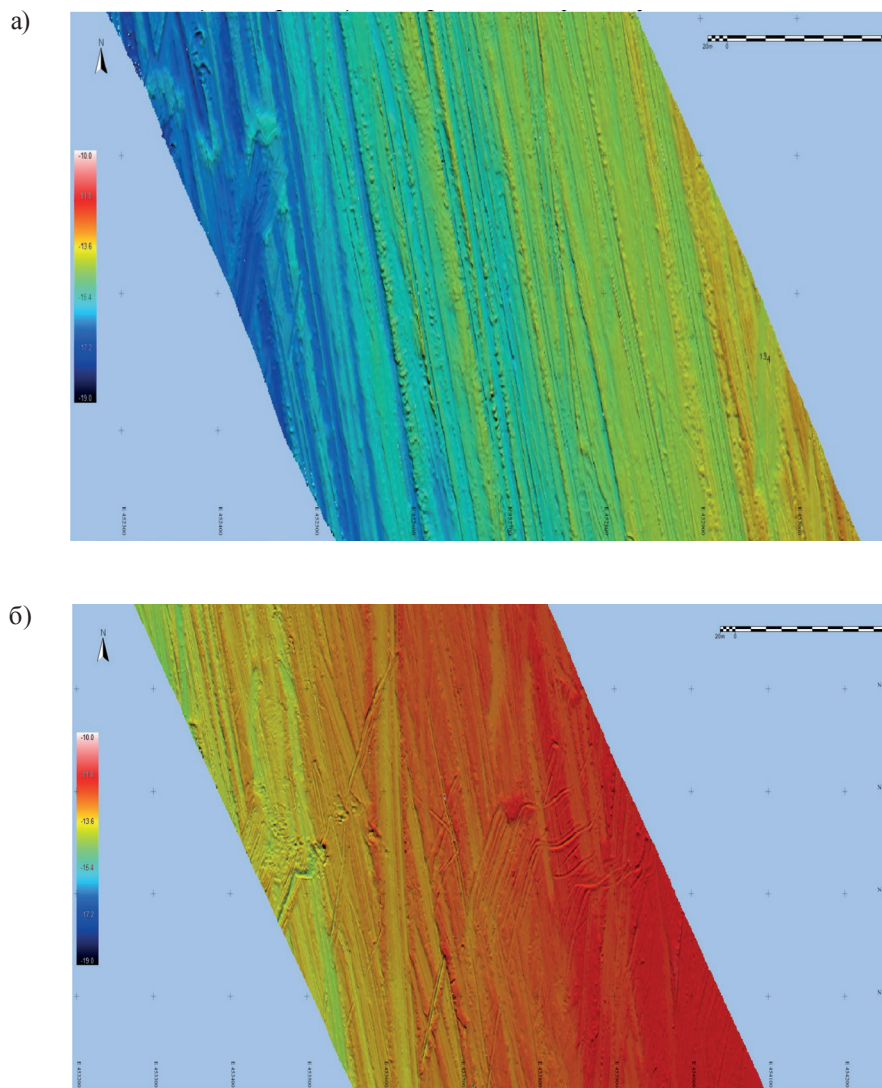


Рис. 1. Фрагменты моделей плоского морского дна с характерными бороздами на его поверхности (район Обской губы):
а — модель 1; б — модель 2

Вопрос о воздействии ледовых образований на морское дно становится одним из наиболее приоритетных направлений в современной отечественной науке. Об этом свидетельствует работа С. А. Огородова в виде серии публикаций на данную тему [11]. Автор, в частности, обращает внимание на тот факт, что нижняя, корневая, часть ледового образования, как правило, выклинивается, приобретая форму кия. Таким образом, в процессе контакта дрейфующего ледового массива с дном на подстилающей поверхности «вычерчиваются» замысловатые рисунки в виде царапин или борозд. В случае многокилевой конфигурации днища торосистого образования структура борозд напоминает «гребёнку». Этот термин, официально введён в научную речь.

Возвращаясь к вопросу глобальных климатических изменений, следует также обратить внимание на указанные доктором геолого-минералогических наук А. Н. Портновым факты. В пределах суши Ямало-Ненецкого автономного округа были обнаружены при наблюдении из космоса глубокие западины, внешне напоминающие кратерные ячейки. Нижняя часть этих «колодцев» оказалась заполненной водой, а непосредственно у надводных горизонтов в пробах воздуха было зафиксировано повышенное содержание метана. По мнению 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 [12].

По материалам проводимых в мире геофизических съёмок в толщах морского дна помимо заполярной зоны солидные запасы CH_4 (в связанном состоянии) были обнаружены и на других широтах. В виде твёрдых гидратов (соединений метана с водой) они были найдены в толще органических донных осадков во многих частях Мирового океана. Как следует из иностранных источников, запасы метана в форме газогидратов нередко обнаруживаются прямо на поверхности морского дна [10]. Поднятые со дна моря куски газогидрата внешне напоминают вывалившиеся в грязи обломки льда, откуда следует, что это и есть лёд, но с высоким содержанием метана. По имеющимся оценкам, его запасы в глубинах океана весьма впечатляющие. Согласно некоторым данным, около 50 % всего имеющегося на Земле углерода заключено именно в этих гидратах.

Однако, если перевести проблематику в практическую плоскость, трудно представить себе возможность в ближайшем будущем появления соответствующих технологий по добыче описываемого энергоносителя в промышленных масштабах. Это представляется маловероятным, поскольку речь в данном случае идёт не о каких-либо локализованных в пространстве (точечных) источниках, а об обширных газогидратных полях.

Летом 2014 г. в процессе исследования юго-западной части акватории Карского моря с использованием МЛЭ EM2040CD (Kongsberg) было зафиксировано куполообразное возвышение над ровной поверхностью дна [13]. Правильный по форме куполообразный объект на ровном дне может вызывать сугубо геоморфологический интерес. Однако расположение данного бугристого образования совпало с местом выброса (эксплозии) из земных недр облака газовых пузырей. Явление зафиксировано непосредственно в режиме реального времени в виде точечного газового факела, а также наглядно представлено на фоне ЦМРД с помощью специализированного программного пакета «Fledermause» (рис. 2). Наивысшая точка этого образования соответствовала глубине 40 м, а его относительная высота (превышение над окружающим плоским дном) составила 30 – 40 м (рис. 3).

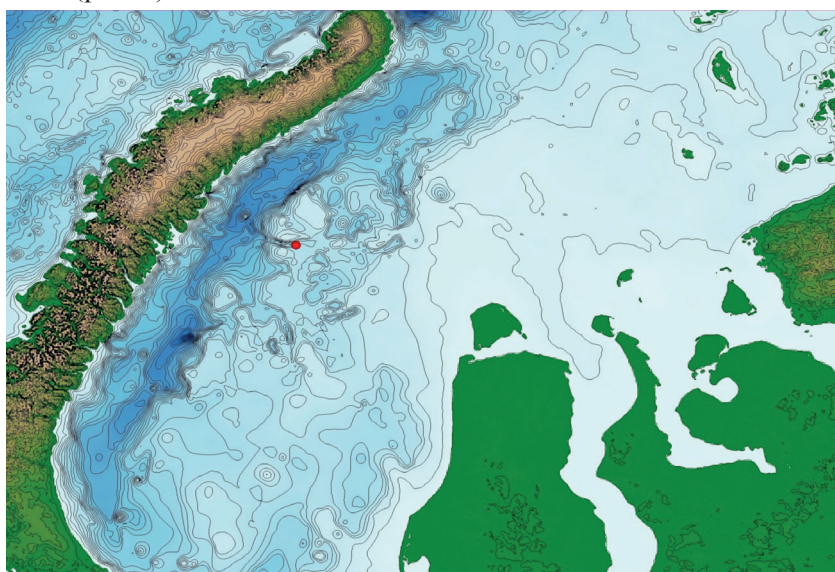


Рис. 2. Карта юго-западной части Карского моря
(место обнаруженной эксплозии обозначено красным кружком)

Согласно имеющимся на сегодня материалам трудно определить, является ли акт газового проявления следствием каких-либо морфологических подвижек или, наоборот, обозначенная на рисунке выпуклость возникла в результате эксплозивных процессов. Обнаруженная форма внешне напоминает повсеместно распространённые в районах вечной мерзлоты (на суше) бугры пучения. Высота подобных бугров относительно окружающих равнин и может достигать 30 – 40 м. Их диаметр в нижнем сечении измеряется сотнями метров, а порой и первыми километрами. Однако в контексте разрабатываемой тематики речь идёт лишь о гидролакколитах.

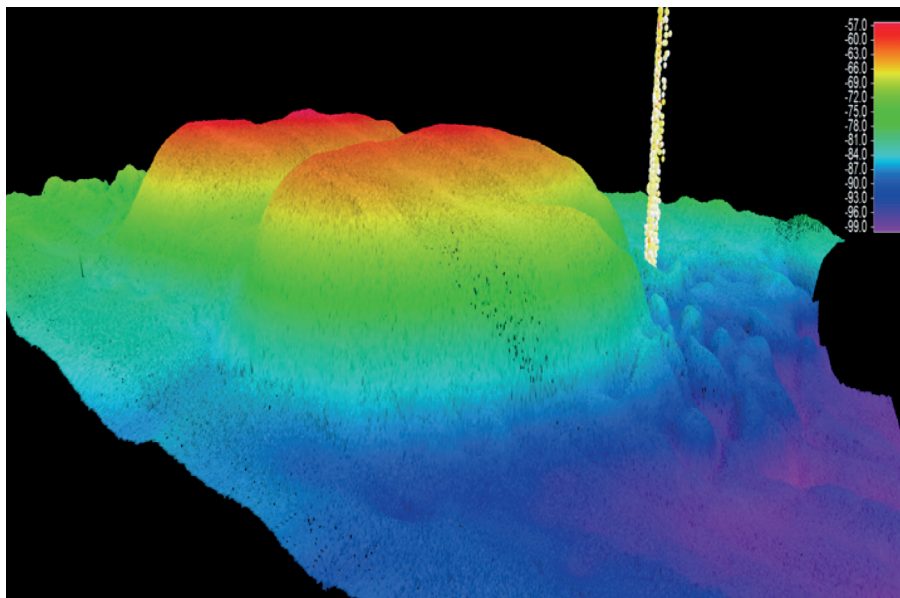


Рис. 3. Положительная форма подводного рельефа с эксплозией

Вулканическая деятельность на Земле, с характерными для неё положительными 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). Исследуемое образование уже в силу своих линейных и морфологических характеристик генетически более подходит к категории гидролакколитов. Безусловно, рассматриваемый феномен хотя бы в сугубо научном плане может вызвать у специалистов тот или иной интерес. Но в конкретной публикации главным является не столько происхождение данного бугра, сколько факт пространственной привязки наблюдаемой точечной эксплозии к определённой форме рельефа. При более подробном изучении обнаруженной формы ближе к её основанию чётко просматривается ряд кольцевидных ячеек, напоминающих сквозные отверстия. Скорее всего, эти точечные углубления и служат каналами выхода газа, что, собственно, и подтверждается непосредственным актом газопроявления над жерлом одной из ячеек на момент съёмки (рис. 4).

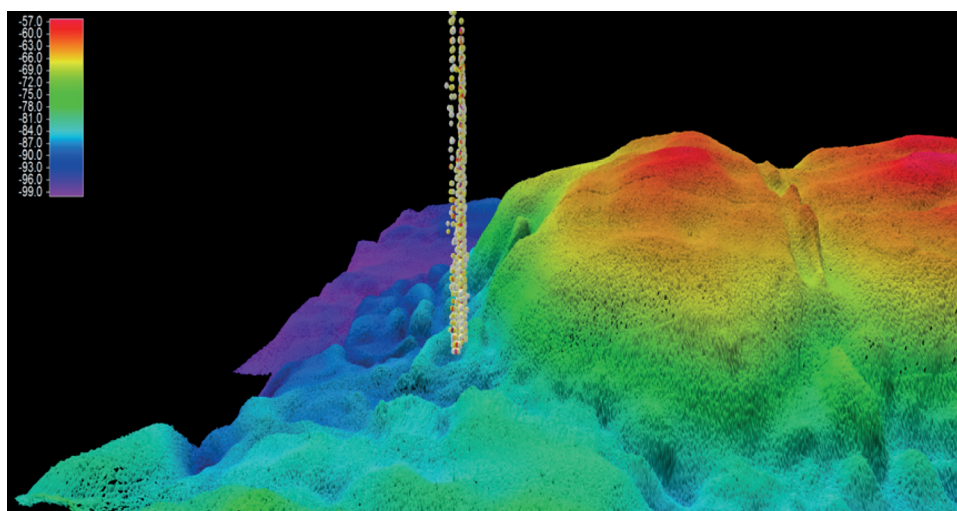


Рис. 4. Момент выброса газовой струи из толщи донных осадков

В случае, если подтвердится закономерность пространственной привязки очагов дегазации к конкретным подводным формам рельефа, вопросы поиска и разведки участков альтернативных

носителей энергии могут стать весьма актуальным научным направлением и хорошей инженерной перспективой. Именно локализованный (струйчатый) вариант газопроявления, по сравнению с его площадными формами, представляется наиболее доступным в плане реализации конкретных проектов по добыче газогидратов в промышленных масштабах [9].

По моему мнению, вероятнее всего, подобные локализованные очаги или хотя бы часть из них генетически приурочены к тем или иным формам подводного рельефа. При этом фактор газопроявления вряд ли относится к категории процессов экзогенного свойства, т. е. едва ли связан с глубинными процессами, происходящими в земной коре, в том числе с сульфатарным вулканизмом. В этом случае именно морфологический подход наряду с комплексом акустических измерений может оказаться решающим в определении методологии поиска и разведки промышленных залежей газогидрата. Как свидетельствуют данные, приведенные в иностранных источниках, из одного кубического метра твёрдого гидрата можно выделить до 164 м³ газообразного метана. Газогидратное тело, как правило, представляет собой массивное образование, уходящее в толщу донных осадков на десятки и сотни метров. Поэтому в поисково-разведочный комплекс наряду с МЛЭ обязательно должен входить и акустический профилограф. Данный вопрос более подробно рассмотрен в работе [8].

Мировым сообществом газогидраты рассматриваются в качестве перспективной альтернативы современного топлива, причем недостаточно изученной. Интерес к изучению газогидратов природного происхождения в мире значительно возрос в течение последних двух десятилетий. В Арктике газогидраты в основном встречаются в относительно недоступных морских районах, что в перспективе будет значительно препятствовать их освоению ввиду отсутствия инфраструктуры для добычи и транспортировки газа. На данном этапе остро стоит вопрос организации именно поиска и разведки залежей газогидрата на дне арктических морей, которые могут осуществляться попутно с проведением любых исследовательских работ (включая и гидрографические) при наличии на борту судна комплекса гидроакустической аппаратуры. Развитие использования газогидратных энергоносителей в российской Арктике будет зависеть не только от научно-технических разработок, но и от социальных, экономических, экологических и политических соображений. Видное место занимает также необходимость сокращения выбросов парниковых газов.

В заключение необходимо особое внимание обратить на факт появления нового поколения гидроакустической аппаратуры, дающей возможность минимизировать экологические риски при освоении дна в условиях глобальных климатических изменений. Современный гидроакустический комплекс способен давать большой объем информации о морском дне в режиме реального времени. В период экспедиционных работ должна быть обеспечена регистрация максимального объема данных, способных после окончательной обработки дать новую комплексную информацию о состоянии и развитии морского дна. При помощи гидрографических технологий можно обнаруживать и прогнозировать дальнейшее проявления термокарстовых процессов, способных создавать угрозу сохранности трубопроводных магистралей и любых иных подводных коммуникаций.

Комплекс гидрографических работ с применением новейшего оборудования открывает перспективу целенаправленного поиска очагов концентрации газогидратных месторождений образованных в процессе глобальных климатических изменений. С тех пор как мировые запасы газогидратов стали считаться глобальным источником метана, к ним возник значительный интерес. Одновременно встал вопрос об их влиянии на климат, в частности, о влиянии метанового проявления в море на изменение уровня атмосферного и океанического потепления. Особый интерес представляет реакция глобальной климатической системы на значительное количество метана, освобождающееся из газогидратных резервуаров зон вечной мерзлоты. Эти вопросы еще недостаточно исследованы ввиду того, что изучение и разработка газогидратов в мире, в том числе в Арктике, ведется относительно с недавно. Следует констатировать, что в России вопросам поиска и разведки залежей газогидрата на дне арктических морей пока не уделяется должного внимания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинсбург Г. Д. Субмаринные газовые гидраты / Г. Д. Гинсбург, В. А. Соловьёв. — СПб.: ВНИИ Океангеология, 1994. — 199 с.
2. Кожухов И. В. Электронная инженерная гидрография и перспективы получения новых данных по морфологии и геоэкологии арктических морей / И. В. Кожухов, Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 95–103.
3. Ключев Е. В. Роль мерзлотных факторов в динамике рельефа дна полярных морей: автореферат диссертации / Е. В. Ключев. — Л.: ЛГУ, Географический факультет, 1967. — 14 с.
4. Исследование трассы трубопровода и экологической обстановки в Печорском море. Арктическое побережье России. — СПб.: Госниипас, 1997. — 119 с.
5. Кожухов И. В. Северный регион Российской Федерации как зона экологического риска и новый технологический этап освоения Арктики / И. В. Кожухов, Ю. Г. Фирсов, Н. Ю. Гордиенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2013. — 2 (72). — С. 73–78.
6. Shakhova N. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle / N. Shakhova, I. Semiletov, G. Pantelev // Geophysical Research Letters. — 2005. — Vol. 32. — Is. 9. DOI: 10.1029/2005GL022751.
7. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие. — СПб.: Нестор-история, 2010. — 348 с.
8. 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.
9. Колосков Е. Н. Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопроявления в северных морях России / Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 54–62.
10. Paull C. K. Seafloor geomorphic manifestations of gas venting and shallow subbottom gas hydrate occurrences / C. K. Paull, D. W. Caress, H. Thomas, E. Lundsten, K. Anderson, R. Gwiazda, M. Riedel, M. McGann, J. C. Herguera // Geosphere. — 2015. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 491–513. DOI:10.1130/GES01012.1.
11. Огородов С. А. Рельефообразующая деятельность морских льдов: автореферат диссертации / С. А. Огородов. — М.: МГУ, Географический факультет, 2014. — 44 с.
12. Портнов А. Н. Опасные дыры Земли / А. Н. Портнов // Природа. — 2014. — № 11 (1191). — С. 94–96.
13. 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.

THE INTERDEPENDENCE OF HYDROGRAPHY AND MARINE ECOLOGY IN THE CONTEXT ARCTIC SEAS CLIMATE CHANGE AND ITS CONSEQUENCES

The study examines the implementation of modern hydrographic technologies for Russian northern seas micro relief investigations and using this data for the justification of global climate change.

The modern hydrographic equipment presented by multibeam echosounders and bathymetric side scan sonars provide the possibility to obtain not only the detailed seabed topography, but also the additional information concerning the structure of under bottom soil layers and presence of the endogenous objects in near bottom environment. This opens the new opportunities for investigation of the morphological relief peculiarities and getting the new information using the acoustic techniques for various types of marine activity including the marine ecology study. The main attention is paid to consequences of the global climate change and its influence on the bottom sole. The appearance of thermokarst activity is produced which provides the potential threat for underwater pipelines and other submarine communications.

The arctic bottom relief peculiarities are also covered including grounded hummock traces and dome-shaped elevations of the Pingo-type. The investigations of such bottom land form has become possible recently as the result of the wide swath survey methods. Such unique relief features are related to seafloor gas venting in the form of the submarine gas-hydrates seeps.

Keywords: hydrographic technologies, marine ecology, morphological relief peculiarities, bottom soil, arctic seas, hydro acoustics methods, submarine gas-hydrates, seafloor gas venting, pingo, thermokarst.

REFERENCES

1. Ginsburg, G. D., and V. A. Soloviov. *Submarinnie gazovie gidrati*. SPb.: VNII Okeangeologiya, 1994.
2. Kozhuhov, I. V., E. N. Koloskov, and Y. G. Firsov. "Electronic engineering hydrography and the prospects of obtaining new results on the morphology and bottom environmental conditions of the arctic seas." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 95–103.
3. Klyuev, E. V. Rol merzlotnykh faktorov v dinamike relefa dna polyarnykh morej: abstract of diss. L.: LGU, Geograficheskij fakultet, 1967.
4. *Issledovanie trassy truboprovoda i ekologicheskoy obstanovki v Pechorskom more. Arkticheskoe poberezhie Rossii*. SPb.: Gosniopas, 1997.
5. Kozhuhov, I. V., Y. G. Firsov, and N. Y. Gordienko. "Northern region of Russia as a zone of ecological risk and a new technologic stage in the Arctic exploration." *Jekspluatatsiya morskogo transporta* 2(72) (2013): 73–78.
6. Shakhova, Natalia, Igor Semiletov, and Gleb Pantelev. "The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle." *Geophysical Research Letters* 32.9 (2005). DOI: 10.1029/2005GL022751.
7. Firsov, Y. G. *Osnovy gidroakustiki i ispolzovaniya gidrograficheskikh sonarov. Uchebnoe posobie*. SPb.: Nestor-istoriya, 2010.
8. Firsov, Y. G., and I. V. Kozhuhov. "The new three dimensional visualization techniques for bathymetric engineering survey." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 17–23.
9. Koloskov, E. N., and Y. G. Firsov. "Implementation of the new hydrographic technologies for bottom topography and seafloor gas venting investigations in the Russian northern seas." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 54–62.
10. Paull, C. K., D. W. Caress, H. Thomas, E. Lundsten, K. Anderson, R. Gwiazda, M. Riedel, M. McGann, and J. C. Herguera. "Seafloor geomorphic manifestations of gas venting and shallow subbottom gas hydrate occurrences." *Geosphere* 11.2 (2015): 491–513. DOI:10.1130/GES01012.1
11. Ogorodov, S. A. Relefoobrazuyushchaya deyatelnost morskikh ldov: abstract of diss. M.: MGU, Geograficheskij fakultet, 2014.
12. Portnov, A. M. "Dangerous Holes in Earth." *Priroda* 11(1191) (2014): 94–96.
13. Firsov, Yu.G., M. V. Ivanov, and E. N. Koloskov. "The new stage of the Russian northern basins bathymetric investigations - Kara sea example." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 115–124.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Колосков Евгений Николаевич — аспирант.
Научный руководитель:
Фирсов Юрий Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
evgenklsv@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Koloskov Evgeniy Nikolayevich — postgraduate.
Supervisor:
Firsov Jurij Georgievich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
evgenklsv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2015 г.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 629.122.004.69

**А. Н. Лазарев,
С. С. Марченко**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ СУДОВ СМЕШАННОГО «РЕКА – МОРЕ» ПЛАВАНИЯ

В статье рассматриваются содержание понятия модернизация судна и основные направления ее проведения в сочетании с проблемами повышения конкурентоспособности судов смешанного «река – море» плавания и обновления всего состава этого вида флота. Предложено понятие для гражданского судостроения и судоремонта — модернизационная пригодность судов, — которое будет способствовать решению вопросов обоснования проведения модернизации судов с целью повышения конкурентоспособности. Произведена классификация факторов конкурентоспособности судов смешанного плавания и их распределение по классификационным группам по направленности, возможности изменения (управляемости) и способу регулирования их значения. Проанализирована проблема основных возможностей снижения среднего возраста судов смешанного плавания и повышения их конкурентоспособности на международном рынке морских перевозок. Произведено сопоставление фактических затрат на модернизацию и постройку новых судов аналогичного назначения.

Ключевые слова: модернизация; переоборудование; реновация; конкурентоспособность; обновление флота.

Введение

Вопросы модернизации флота российских судоходных компаний уже несколько последних лет поднимаются на уровне правительства страны и отдельных министерств. Одним из основных направлений обновления флота, наряду со строительством новых судов, на государственном уровне признается проведение модернизации эксплуатируемых судов. В «Концепции развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации», одобренной распоряжением Правительства РФ от 3 июля 2003 г. № 909-р, а также в «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года» одной из задач по улучшению функционирования и повышению конкурентоспособности отрасли, развитию транспортной системы на водном транспорте поставлено проведение реновации судов, ремонта и модернизации флота на судоремонтных предприятиях отрасли [1], [2].

Понятие «модернизация» обычно употребляется в отношении производственных имущественных комплексов (участки, цеха и т. д.), машин и оборудования. «Модернизация объекта основных средств — это приведение данного объекта в соответствие с современными требованиями применения (эксплуатации) объекта путем его конструктивного изменения» [3, с. 151]. Под модернизацией судна «понимается совокупность операций по изменению конструкции судна с целью повышения технико-эксплуатационных характеристик, условий труда и быта, а также выполнения требований Международных конвенций» [4]. В исследованиях С. С. Марченко отмечается, что модернизация судов смешанного «река – море» плавания (далее — ССП) в целом, как правило, приурочивается к времени проведения среднего ремонта, а работы, связанные с реновацией корпуса, переоборудованием судна и модернизацией СЭУ, включаются в состав работ по модернизации судна [5], [6].

По нашему мнению, можно ввести более широкое понятие для российского гражданского судостроения и судоремонта — *модернизационная пригодность судов* (модпригодность), под которой будет пониматься комплексное свойство судна, определяющее возможность и целесообразность проведения модернизационных работ в конкретный момент времени с целью повышения

уровня его конкурентоспособности с учетом физического и морального износа. Из данного определения следует, что:

- перед принятием управленческих решений о целесообразности проведения модернизации судов с целью обновления состава флота судоходной компании необходимо детально проанализировать техническое состояние всех судов, очередность и качество проведенных ранее плановых ремонтов, возраст судов, чтобы выбрать наиболее подходящие суда с точки зрения экономической эффективности их дальнейшей эксплуатации;
- следует оценить уровень морального износа судна, возможность повышения технико-эксплуатационных характеристик судов к значениям близким к характеристикам новых судов;
- проведение модернизации судов, оценку ее целесообразности следует рассматривать через призму конкурентоспособности.

Рассмотрим содержание основных составляющих модернизации судна: реновация, переоборудование и модернизация СЭУ.

Реновация — (от лат. — *renovatio* — обновление, возобновление) является процессом улучшения структуры [7]. Обновление (реновация) судов предполагает получение от классификационного общества сертификата Hull Renovation установленной формы, которое подтверждает присвоение судну одного из уровней реновации в зависимости от объема восстановительных работ: 1SS, 2SS, 3SS, из которых следует, что техническое состояние судна соответствует состоянию после пяти, десяти или 15 лет эксплуатации от даты постройки судна соответственно [8].

Переоборудование судна может сводиться к увеличению дедвейта судна: одномерное увеличение; двухмерное увеличение; трехмерное увеличение. Основным вариантом одномерного увеличения дедвейта судов является удлинение их корпуса. Основным вариантом двухмерного увеличения дедвейта является удлинение судна и повышение высоты борта. Подобная модернизация может быть осуществлена как заменой части корпуса новой, более крупной частью, так и с помощью вставок и наделок. Одним из основных преимуществ двухмерного увеличения дедвейта судов перед одномерным является возможность более значительного роста дедвейта судов без установки дополнительных связей для обеспечения продольной прочности. Известны случаи увеличения длины и ширины судов путем замены большей части их корпуса новой, более длинной и широкой частью. Такое решение оказывается рациональным в условиях ограничения осадки [4], [7]. Трехмерное увеличение дедвейта судов путем их переоборудования может проводиться с целью максимального повышения их грузоподъемности, а также увеличения дедвейта судов на 75 – 90 %. Основным путем решения задачи является замена носовой и средней части корпуса судов с кормовым расположением энергетической установки новой, более крупной частью. Чаще всего это практикуется при размерной модернизации наливных судов [6], [9].

Также переоборудование судов может осуществляться с целью реклассификации (повышения класса) судов и изменения назначения судна с сохранением или изменением его класса. Реклассификация позволяет расширить районы эксплуатации судна [10]. В этих случаях могут выполняться следующие работы:

- «подкрепление корпуса для обеспечения требуемого стандарта прочности;
- доведение снабжения судна до норм, требуемых Правилами для данного класса;
- монтаж дополнительного оборудования, требуемого классом и районом плавания;
- доведение судна до требований международных конвенций» [10, с. 19].

Результатами *модернизации СЭУ* могут стать:

- снижение удельных расходов топлива и масла на единицу мощности СЭУ;
- повышение мощности СЭУ;
- снижение массы СЭУ;
- увеличение скорости хода судна;

– снижение эксплуатационных расходов.

Судно, имеющее документ Регистра об обновлении и модернизации, имеет ряд преимуществ по уровню конкурентоспособности по сравнению с другими судами того же возраста и назначения. К ним можно отнести:

- «повышение безопасности плавания и снижение риска потери судна со всеми вытекающими последствиями;
- пересмотр периодичности классификационных освидетельствований;
- восстановление прав на отсрочку сроков периодических освидетельствований» [11, с. 2];
- «преимущества на фрахтовом и страховом рынках» [10, с. 29].

Проведение процедур модернизации и реновации позволяет судовладельцу эксплуатировать судно в портах, где есть ограничения по возрасту судов [8]. Так в зарубежной практике модернизационные работы часто связаны не только с изменением типа, возможностей и главных размеров судна, но и с установлением новой даты постройки, т. е. с омоложением состава флота. В отечественной практике также проводились модернизационные работы, направленные на снижение возраста и повышение конкурентоспособности судов [12].

Постановка задачи

Анализ научных разработок в области модернизации судов и повышения их конкурентоспособности (работы д-ра экон. наук А. А. Булова, д-ра экон. наук Л. Н. Буяновой, д-ра техн. наук С. И. Логачева и др.) [13] – [17] показывает, что до сих пор не делалось попыток связать эти вопросы с проблемой нахождения наиболее эффективных направлений обновления состава флота ССП. Необходимо теоретическое обоснование наиболее эффективного на современном этапе экономического развития РФ направления обновления состава флота ССП путем модернизации с одновременным повышением их конкурентоспособности на мировом рынке.

Описание результатов

Как следует из введения, теоретические аспекты модернизации напрямую связаны с вопросами повышения конкурентоспособности ССП и направлением обновления их состава. В работе [18] авторами на примере сухогрузных ССП уже рассматривались факторы конкурентоспособности, которые могут быть использованы в качестве частных показателей при экономической оценке целесообразности проведения модернизации судна. Однако не была произведена их классификация, позволяющая установить взаимосвязь между факторами конкурентоспособности и модернизацией судна. Представим рассмотренные в [18] факторы с указанием возможных методов их оценки (табл.). Как следует из таблицы, абсолютное большинство показателей (факторов) конкурентоспособности (16 из 27) могут быть оценены количественно, три фактора поддаются оценке как количественно, так и качественно, а оценка восьми факторов может быть произведена лишь субъективным путем.

В работах [5] и [18] уже отмечалось, что конечной целью модернизации отдельных судов является повышение конкурентоспособности не только этих судов, но и конкурентоспособности судоходной компании (СК) в целом. Проведем классификацию факторов конкурентоспособности ССП с точки зрения повышения конкурентоспособности СК (рис. с. 80).

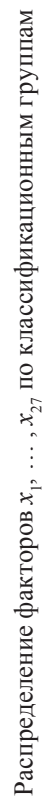
Таблица

Факторы конкурентоспособности сухогрузных ССП

Наименование фактора	Условное обозначение	Возможность оценки	
		количественной	качественной
1. Автономность	X_1	+	–
2. Класс Регистра	X_2	–	+

Продолжение табл.

3. Среднегодовые удельные затраты на ремонт	X_3	+	–
4. Род перевозимого груза (универсальность)	X_4	–	+
5. Судовладелец (имидж судоходной компании)	X_5	–	+
6. Состояние фрахтового рынка	X_6	–	+
7. Возраст судна	X_7	+	+
8. Срок действия документов Регистра (оценка технического состояния судна)	X_8	+	–
9. Уровень морального износа судна	X_9	+	+
10. Осадка в грузу (река – море)	X_{10}	+	+
11. Затраты на топливо на ходу	X_{11}	+	–
12. Соответствие судна международным правилам и конвенциям	X_{12}	–	+
13. Скорость судна в грузу	X_{13}	+	–
14. Рейсовые расходы	X_{14}	+	–
15. Дедвейт (грузоподъемность)	X_{15}	+	–
16. Тайм-чартерный эквивалент	X_{16}	+	–
17. Место постройки (страна)	X_{17}	–	+
18. Налоговое законодательство	X_{18}	–	+
19. Минимальная численность экипажа	X_{19}	+	–
20. Стоимость постройки судна на дату постройки	X_{20}	+	–
21. Стоимость постройки судна на дату оценки конкурентоспособности	X_{21}	+	–
22. Регистровая вместимость	X_{22}	+	–
23. Место последнего ремонта	X_{23}	–	+
24. Среднегодовой удельный чистый доход на 1 т дедвейта (грузоподъемности)	X_{24}	+	–
25. Удельная мощность СЭУ на 1 т дедвейта	X_{25}	+	–
26. Годы постройки судов данного проекта	X_{26}	+	–
27. Суточные эксплуатационные расходы (без топлива)	X_{27}	+	–



Как следует из рисунка, на большинство технико-эксплуатационных и эксплуатационно-экономических факторов судов, которые выступают в качестве частных показателей их конкурентоспособности, возможно оказывать воздействие двумя основными способами: проведением модернизации судов и замены судов новыми. По данным директора департамента судостроительной промышленности и морской техники Министерства промышленности и торговли РФ М. Н. Кочеткова российский речной флот нуждается в масштабном обновлении. Средний возраст судов речного флота составляет 36 лет [19]. Отечественный водный транспорт в марте 2015 г. по данным Морского Инженерного Бюро имел 22740 судов со средним возрастом 33,2 года. [20]. Очевидно, что физический и моральный износ судов отрицательно сказывается на их конкурентоспособности, что, в свою очередь, отрицательно сказывается как на конкурентоспособности судоходных компаний, так и на отрасли водного транспорта в целом.

В качестве одной из основных проблем обновления флота М. Н. Кочетков отмечает высокую стоимость строительства судов. Стоимость одной единицы может достигать до 500 млн руб. [19]. В качестве примера дорогостоящих новых современных судов отметим строительство сухогрузных судов дедвейтом 5716 т типа «Герои Сталинграда» класса «Волго – Дон макс.», стоимость которых доходила до \$15,1 млн [21]. Длительность постройки судов данного типа от даты закладки до даты сдачи на Окской судовой верфи составляет от 10 до 14 мес. [22]. В проекте «Стратегия развития внутреннего водного транспорта РФ до 2030 года», одобренным на заседании Правительства РФ 17.10.2013 г., планируется построить 698 ССП, однако возможности отечественных судостроительных предприятий («Окская судовой верфь», «Красное Сормово» и др.) позволяют строить ежегодно не более 30 наиболее востребованных судов класса «Волго – Дон макс.», что говорит об очевидном разрыве между возможностями судостроительных предприятий России и потребностями отечественных судоходных компаний.

В условиях высокой стоимости и долгих сроков постройки новых судов, недостаточной производственной мощности российских судостроительных предприятий актуальным направлением омоложения российского флота становится модернизация действующих судов, которая может в значительной мере снизить средний возраст судов посредством проведения их реновации. Анализ различных оценок стоимости модернизации (реновации) судов внутреннего и смешанного плавания позволяет заключить, что максимальные затраты на ее проведение могут составлять до 30 % стоимости строительства нового судна [23]. Одним из примеров модернизации судна является средний ремонт теплохода «Омский-143» с одновременной его переклассификацией с класса М-СП Российского Речного Регистра на класс КМ*L4R3-RSN Российского Морского Регистра Судоходства. Затраты на модернизацию судна на 2011 г. по данным ФБОУ ВПО «МГАВТ» составили 13,6 млн руб. Одновременно был получен от классификационного общества сертификат Hull Renovation, который подтверждает присвоение судну 1990 г. даты постройки уровень реновации 2SS (и тем самым снижение возраста на 11 лет [24]).

Таким образом, на современном этапе развития экономики РФ:

- продолжение эксплуатации физически и морально устаревших судов экономически нецелесообразно в связи с низкой их конкурентоспособностью;
- замена морально устаревших судов новыми конкурентоспособными судами требует значительных капитальных вложений и достаточно длительного периода времени. Эта задача не может быть решена в течение ближайшего времени и требует нереальных для текущего момента капитальных затрат. Одновременно при реализации этого направления возможны значительные финансовые потери от недоамортизации выводимых из эксплуатации судов;
- несмотря на практическую невозможность повышения уровня конкурентоспособности модернизируемых судов до уровня конкурентоспособности новых судов проведение модернизации позволит значительно продлить продолжительность периода времени, необходимого для полной замены старых судов новыми.

Выводы

1. Предложено ввести понятие *модернизационная пригодность*, которое может способствовать развитию методологических основ экономической оценки повышения конкурентоспособности ССП путем их модернизации.
2. Классификация факторов конкурентоспособности судов (см. табл.) позволила сгруппировать их по возможности и способу изменения с целью повышения конкурентоспособности судовой компании в целом (см. рисунок с. 80).
3. Выполненный анализ теоретических аспектов модернизации судов позволяет однозначно установить, что на современном этапе развития экономики РФ она является наиболее эффективным направлением обновления состава ССП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ № 909-р от 3 июля 2003 г. Концепция развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://bestpravo.ru/federalnoje/hj-pravo/m4r.htm> (дата обращения: 25.12.2015).
2. Распоряжение Правительства РФ № 1734-р от 22 ноября 2008 г. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13008 (дата обращения: 25.12.2015).
3. Ковалев А. П. Управление имуществом на предприятии: учебник / А. П. Ковалев. — М.: Финансы и статистика, Инфра-М, 2009. — 272 с.
4. Лазарев А. Н. Правила ремонта судов Министерства речного флота РСФСР/МРФ РСФСР / А. Н. Лазарев, В. Г. Никифоров, Б. Д. Худяков, В. Л. Черкасов. — М.: Транспорт, 1990. — 72 с.
5. Марченко С. С. Экономическая оценка модернизации сухогрузных судов смешанного плавания: дис. ... канд. экон. наук / С. С. Марченко; ГУМРФ им адм. С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ им адм. С. О. Макарова, 2014. — 155 с.
6. Марченко С. С. Возможности повышения конкурентоспособности сухогрузных судов смешанного плавания за счет модернизации флота / С. С. Марченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 136–143.
7. Словари и энциклопедии. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://dic.academic.ru/searchall.php?SWord=%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F&from=xx&to=ru&did=&stype> (дата обращения: 25.12.2015).
8. Страхование агенство Карго Брокер. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cargobroker.ru/service/cargo-insurance/bulk> (дата обращения: 25.12.2015).
9. Гундобин А. А. Размерная модернизация и переоборудование судов / А. А. Гундобин, Г. Н. Финкель. — Л.: Судостроение, 1977. — 192 с.
10. Ефремов Н. А. О продлении эксплуатационного ресурса судов внутреннего и смешанного («река – море») плавания / Н. А. Ефремов. — М.: Российский Речной Регистр, 2002. — 64 с.
11. Руководство Р.002-2010. Обновление судов внутреннего и смешанного «река – море» плавания. — М.: Российский Речной Регистр, 2010.
12. Копцева Е. П. Экономическая оценка износа судов речного флота: дис. ... канд. экон. наук / Е. П. Копцева. — СПб.: СПГУВК, 2001. — 162 с.
13. Москаленко М. А. Оценка эффективности модернизации корпуса морских судов малой тоннажной группы / М. А. Москаленко, З. М. Субботин, Л. В. Захарина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 88–94.
14. Булов А. А. Развитие перевозок и конкурентоспособности судов «река – море» плавания нового поколения / А. А. Булов, Д. Р. Воронцова // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 245а–251.
15. Буянова Л. Н. Инновации как фактор повышения конкурентоспособности морского флота / Л. Н. Буянова, А. Н. Лазарев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 224а–230.
16. Логачев С. И. Мировое судостроение: современное состояние и перспективы развития / С. И. Логачев, В. В. Чугунов, Е. А. Горин. — 2-е изд., доп. и перераб. — СПб.: Мор. Вест., 2009. — 544 с.

17. Radmilović Z. River-sea shipping — competitiveness of various transport technologies / Z. Radmilović, R. Zobenica, V. Maraš // Journal of Transport Geography. — 2011. — Vol. 19. — Is. 6. — Pp. 1509–1516. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2011.03.002

18. Лазарев А. Н. Классификационный анализ факторов конкурентоспособности сухогрузных судов смешанного «река – море» плавания / А. Н. Лазарев, С. С. Марченко // Логистика: современные тенденции развития: материалы XIV Междунар. научн.-практ. конф. 9, 10 апреля 2015 г. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — С. 214–217.

19. Независимая газета. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ng.ru/news/512739.html> (дата обращения: 25.12.2015).

20. Морское инженерное бюро. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://meb.com.ua/news/news.html?863> (дата обращения: 25.12.2015).

21. Форум камского флота. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://kamafleetforum.ru/lofiversion/index.php/t120-50.html> (дата обращения: 25.12.2015).

22. Морское инженерное бюро. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.meb.com.ua/dry/RSD44.html> (дата обращения: 25.12.2015).

23. Ростов Е. И. Технология и организация реновации корпусов судов речного флота: дис. ... канд. техн. наук / Е. И. Ростов. — СПб.: ГУВК, 2003.

24. Водный транспорт. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fleetphoto.ru/ship/9931/> (дата обращения: 25.12.2015).

THEORETICAL ASPECTS OF MODERNIZATION OF MIXED «RIVER-SEA» NAVIGATION VESSELS

In the article the concept of modernization of the vessel and the main directions of its carrying out in combination with problems of increase of competitiveness of mixed «river-sea» navigation vessels and updatings of all structure of this type of fleet are considered. The new concept for civil shipbuilding and ship repair - modernization suitability of vessels which will promote the solution of questions of justification of carrying out modernization of vessels for the purpose of competitiveness increase is offered.

Classification of factors of competitiveness of courts of mixed «river-sea» navigation vessels and their distribution by classification groups on an orientation, possibility of change (controllability) and a way of regulation of their value is made.

The problem of the main opportunities of decrease in average age of mixed «river-sea» navigation vessels and increase of their competitiveness in the international shipping market is analysed. Comparison of the actual costs of modernization of vessels taking into account their renovation and construction of new vessels of similar appointment is made.

Keywords: modernization; re-equipment; renovation; competitiveness; updating of fleet.

REFERENCES

1. Russian Federation. Government Order N 909-p. 3 July 2003. Konceptiy razvitiy vnutrennego vodnogo transporta Rossiyskoi Federacii.

2. Russian Federation. Government Order. 22 Nov. 2008. Transportnay strategiy Rossiyskoi Federacii na period do 2030 goda.

3. Kovalev, A. P. *Upravlenie imushchestvom na predpriyitiy*. M.: Finansy i statistika: Infra – M, 2009.

4. Lazarev, A. N., V. G. Nikiforov, B. D. Xudiykov, and B. D. Cherkasov. *Pravila remonta sudov ministerstva rechnogo flota RSFSR/MRF RSFSR*. M.: Transport, 1990.

5. Marchenko, S. S. *Economicheskaya ocenka suhogruznykh sudov smeshannogo plavaniy*: PhD diss. (Econ.). Spb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2014.

6. Marchenko S. S. “Possibilities of increase of competitiveness of dry-cargo mixed river-sea navigation vessels at the expense fleet modernization” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(22) (2013): 136–143.

7. Slovare i enciklopedii. Web. 25 Dec. 2015 <<http://dic.academic.ru/searchall.php?SWord=%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F&from=xx&to=ru&did=&stypе>>>.

8. Strahovoe agensstvo Kargo Broker. Web. 25 Dec. 2015 <<http://www.cargobroker.ru/service/cargo-insurance/bulk>>.
9. Gundobin, A. A., and G. N. Finkel. *Razmernay modernizaciy i pereoborudovanie sudov*. L.: Sudostroenie, 1977.
10. Efremov, N. A. *O prodlenii ekspluatacionnogo resursa sudov vnutrennego I smeshannogo plavaniy*. M., 2002.
11. Russian River Register. Manual R.002-2010. Obnovlenie sudov vnutrennego I smeshannogo plavaniy. M., 2010.
12. Kopceva, E. P. *Economicheskay ocenka iznosa sudov rechnogo flota*: PhD diss. (Econ.). SPb.: SPGUWK, 2001.
13. Moskalenko, M. A., Z. M. Subbotin, and L. V. Zaharina. "Assesment of the effective feasibility modernization of hull marine vessels of small tonnage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 88–94.
14. Bulov A. A., and D. R. Voroncova. "Development of transportations and competitiveness of the river-sea swimming vessels of new generation." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2012).
15. Buynova, L. N., and A. N. Lazarev. "Innovation as a factor in increasing the maritime fleet competitiveness." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2012).
16. Logachev, S. I., V. V. Chugunov, and E. A. Gorin. *Mirovye sudostroenie: sovremennoe sostoyanie I perspektivy razvitiy*. Spb.: Mor Vest, 2009.
17. Radmilović, Z., R. Zobenica, and V. Maraš. "River–sea shipping – competitiveness of various transport technologies." *Journal of Transport Geography* 19.6 (2011): 1509–1516. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2011.03.002.
18. Lazarev, A. N., and S. S. Marchenko. "Klassificacionnyi analiz faktorov konkurentosposobnosti suzogruznym sudov smeshannogo plavaniy." *Logistika: sovremennye tendencii razvitiya: materialy XIV Mezhdunar. nauchn.-prakt. Konf.* Spb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015: 214–217.
19. Nezaviciimaiy gazeta. Web. 25 Dec. 2015 <<http://www.ng.ru/news/512739.html>>.
20. Morskoe inzenernoie buro. Web. 25 Dec. 2015 <<http://mef.com.ua/news/news.html?863>>.
21. Forun kamskogo flota. Web. 25 Dec. 2015 <<http://kamafleetforum.ru/lofiversion/index.php/t120-50.html>>.
22. Morskoe inzenernoie buro. Web. 25 Dec. 2015 <<http://www.mef.com.ua/dry/RSD44.html>>.
23. Rostov, E. I. *Tehnologiya i organizacija renovacii korpusov sudov rechnogo flota*: PhD diss. (Tech.). SPb.: GUVK, 2003.
24. Wodnyi transport. Web. 25 Dec. 2015 <<http://fleetphoto.ru/ship/9931/>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лазарев Александр Николаевич —
 доктор технических наук, профессор.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С.О. Макарова»
lasalexnic@mail.ru
 Марченко Сергей Сергеевич —
 кандидат экономических наук, доцент.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С.О. Макарова»
march-ser@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lazarev Aleksandr Nikolaevich —
 Dr. of Technical Sciences, professor.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
lasalexnic@mail.ru, kaf_upp@gumrf.ru
 Marchenko Sergej Sergeevich —
 PhD, associate professor.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
march-ser@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2015 года

СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ МЕТАЛЛА СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ ДО И ПОСЛЕ КОРРОЗИИ

В статье приведены результаты исследований судовых сталей и их сварных соединений при хрупком разрыве до и после коррозии в морской воде. Показано, что при испытании в морской воде сильно ухудшается пластичность сварных соединений судовых сталей. В зоне периодического смачивания морской водой образцы показывают промежуточные результаты. Результаты испытаний на ударный изгиб стали марки РСД32 проката толщиной 50 мм показали, что при минусовых температурах величины ударной вязкости имеют самые низкие значения. Однако в стали марки РСД32Ш величины ударной вязкости в зависимости от температуры имеют несколько иной характер. Так, например, некоторые образцы имеют меньшие значения ударной вязкости при температурах 0 и –20 °С, чем при –40 — +6 °С. Изучение сопротивления хрупкому разрушению сварного соединения стали РСД32, испытанной в различных условиях погружения в морскую воду в течение шести месяцев показало, что все испытанные образцы допускают угол изгиба 30 – 35 град. Увеличение содержания углерода в сварном шве значительно повышает уровень значений предела текучести и временного сопротивления разрыву металла сварных соединений, выполненных ручной сваркой. Определено, что коррозионное воздействие в морской воде ухудшает пластичность сварных соединений, причем низкая пластичность наблюдается в зоне периодического смачивания морской водой.

Ключевые слова: хрупкое разрушение, судовые конструкции, сварное соединение, ударный изгиб, коррозия.

Введение

Создание конструкционных материалов для изготовления судовых конструкций, а также решение вопроса влияния обработки на их структуру и коррозионностойкость требуют знания количественных закономерностей влияния способа сварки на их стойкость в морской воде. Сведения о влиянии термообработки и способа сварки сплава на его механическое и коррозионно-электрохимическое поведение в морской воде при различных условиях представляют интерес и в связи с выяснением механизма растворения, а также пригодности катодной защиты сплавов [1], [2]. Однако при выборе материала для конструирования того или иного изделия для работы при работе в морской воде часто учитывают лишь коррозионные потери металла, которые возникают вследствие развития процессов, т. е. равномерной коррозии, имеющей, как правило, незначительную величину [3], [4]. Для практики такая оценка недостаточна. Она может привести к серьезным ошибкам, так как не учитывает возможность появления сосредоточенной локальной коррозии. Практически же всегда причиной быстрого выхода из строя сооружений являются локальные коррозионные поражения материала, скорость которых в десятки раз выше скорости равномерной коррозии [5], [6]. В то же время в литературе отсутствуют систематические данные по зависимости кинетики растворения сплавов от способа термической обработки и сварки. Такое положение связано с тем, что в условиях морской коррозии сплавов учитывались лишь влияние состава сплава и внешние факторы, так что для оценки коррозионностойкости сплавов указанных факторов недостаточно [7], [8].

Исследования влияния различных способов сварки на изменения структуры, свойства и коррозионную стойкость сварного шва и околошовной зоны при эксплуатации морских сооружений в условиях Каспийского моря представляет определенный интерес [9]. Одна из задач работы — получение информации о коррозионностойкости сплавов после электродуговой сварки в лабораторных и натурных условиях в морской воде. С целью использования такой информации и для заключения о сопротивлении хрупкому разрушению металла судовых конструкций и

их сварных соединений при испытаниях на ударный изгиб до и после коррозии проведены настоящие исследования.

Основная часть

В качестве материалов для изготовления судовых конструкций исследовали листы из стали РСД32, сварку листов проводили электродуговым способом с применением покрытого электрода. Результаты испытания на ударный изгиб исследованных вариантов стали представлены на рис. 1 – 3 в виде значений ударной вязкости и доли волокна в изломе разрушенных образцов в зависимости от температуры испытания до и после коррозии. Испытанию подвергались образцы типов I и II по ГОСТ 9454-78, ориентированных поперек и вдоль направления прокатки. Вырезка образцов производилась из листового проката, а также из металла свальцованных труб в различном состоянии термообработки. Толщина проката составляла 50 мм.

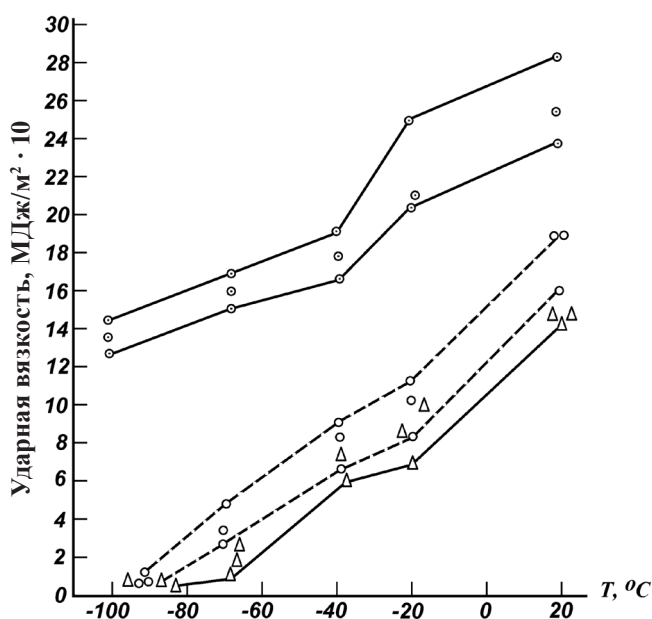


Рис. 1. Результаты испытаний на ударный изгиб стали марки РСД32 толщиной 50 мм:

○ — образцов типа I поперечные; ● — образцов типа II поперечные

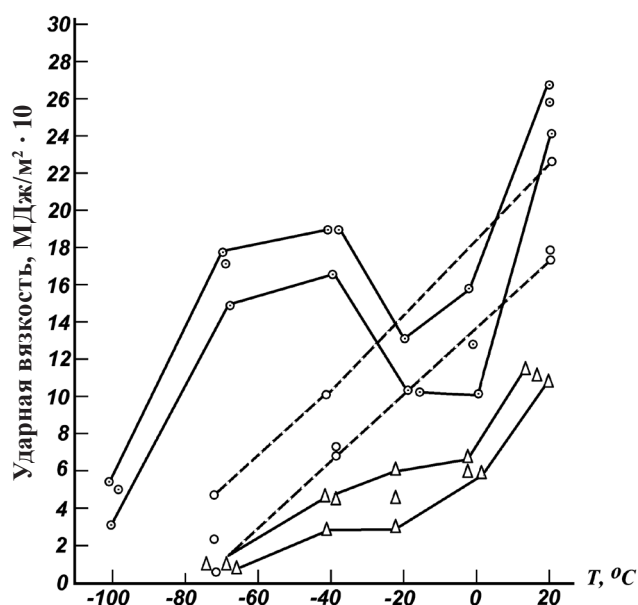


Рис. 2. Результаты испытаний на ударный изгиб стали РСД32Ш из обечайки, подвергшейся термической обработке:

○ — образцов типа I поперечные; ● — образцов типа II поперечные; ▲ — образцов типа II продольные

Анализируя полученные результаты, можно установить, что для сталей РСД32 и РСД32Ш в интервале температур от +20 до –60 — (–70 °С) значения ударной вязкости, определенные на образцах с полукруглым надрезом типа I, вполне удовлетворительны. Отрицательное влияние остроты надреза на абсолютные значения ударной вязкости проявляется достаточно отчетливо в зоне хрупких разрушений. Анизотропия ударной вязкости по результатам испытаний продольных и поперечных образцов типа II незначительная.

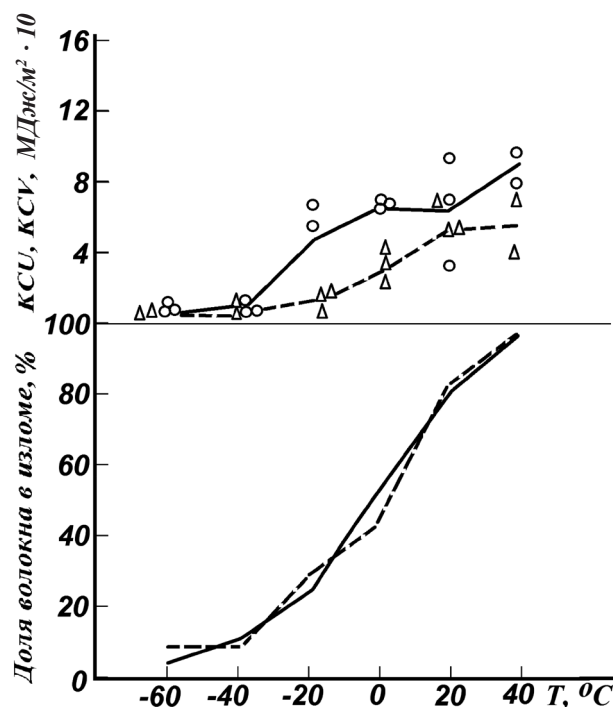


Рис. 3. Ударная вязкость и доля волокна в изломе стали РСД32Ш в направлении Z:
О — тип I; Δ — тип II

Исследованная сталь марки РСД32Ш обладает несколько меньшим сопротивлением динамическому разрушению в направлении толщины проката, несмотря на несколько более низкое значение критической температуры — $T_k^{50} = 5\text{ }^\circ\text{C}$. Удельная работа разрушения при $T = -20\text{ }^\circ\text{C}$ составляет $KCU = 0,2 — 0,68\text{ МДж/м}^2$. Пример несплошности, выявленной при испытаниях на ударных изгибах, представлен на рис. 4. Оценка сопротивления хрупкому разрушению сварных соединений обечаек производилась при испытании на ударный изгиб образцов типа I, вырезанных из центра сварного шва и по границе сплавления основного металла в корневой зоне шва.



Рис. 4. Макроизлом несплошности толстолистового проката из стали марки РСД32Ш, выявленный при испытаниях на ударный изгиб (x20)

В результате проведенного анализа химического состава металла сварного соединения, выполненного электродами марки ОЗС-18, установлено, что содержание марганца в нем (1,0 %) находится на верхнем пределе марочного состава по ГОСТ 9466-75, 9467-75, ТУ 4-804-77, а содержание углерода (0,17 %) более чем в 1,5 раза превышает предельно допустимую норму ($C \leq 0,11 \%$). Этим следует объяснить высокие значения характеристики прочностных свойств металла шва, выполненного электродами марки ОЗС-18, что отрицательно может сказаться на трещиностойкости соединения в целом. Результаты влияния на механические свойства низколегированной стали с содержанием марганца (1 %) и углерода (0,17 %) объясняется переходом от ферритно-перлитной структуры металла к бейнитной или частично аустенитной, т. е. повышаются прочностные характеристики, но снижаются пластические свойства металла.

Наряду с указанным, представляет интерес информация о влиянии коррозионной среды на механические свойства сварных соединений сталей [10]. С этой целью нами были испытаны образцы из сварного соединения стали РСД32 после коррозионного разрушения при различных условиях соприкосновения с морской водой в течение шести месяцев. При испытании на изгиб образцов, вырезанных из сварного соединения после ручной сварки и подверженных коррозионному разрушению, были получены следующие результаты (рис. 5). Для сопоставления испытан образец из сварного соединения, не подвергавшийся коррозионному разрушению.

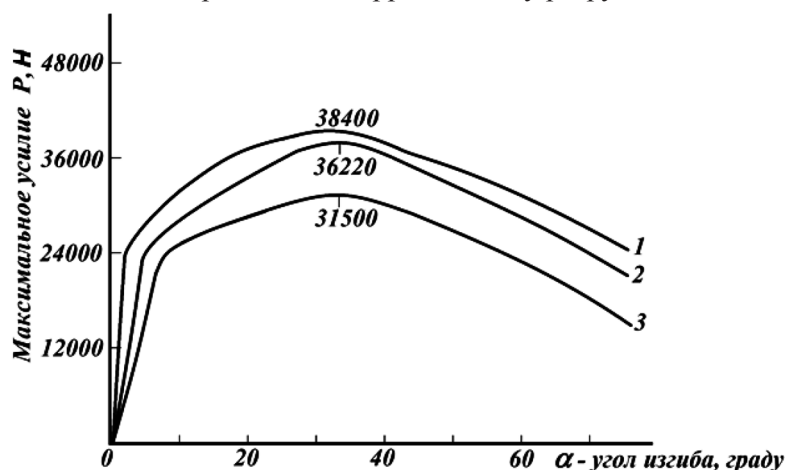


Рис. 5. Сопротивление хрупкому разрушению после ручной сварки сварного соединения стали РСД32, испытанного в различных условиях погружения в морскую воду в течение шести месяцев:

- 1 — образец, не подвергшийся коррозионному разрушению;
- 2 — образец, испытанный при полном погружении;
- 3 — образец, размещенный в зоне периодического смачивания

Из результатов, представленных на рис. 5, видно, что все испытанные образцы допускают угол изгиба 30 — 35 град. Однако разрушение образцов в зависимости от их состояния и от условия погружения в морскую воду происходит при различных нагрузках, а именно до коррозионного разрушения 38400 Н, после коррозии при полном погружении 36220 Н, а в зоне периодического смачивания 31500 Н.

Заключительная часть

Данные исследования показывают, что коррозионное разрушение ухудшает пластичность сварных соединений. При этом самая низкая пластичность наблюдается на образце, размещенном в зоне периодического смачивания, что указывает на более интенсивное коррозионное разрушение в указанной зоне.

Анализ полученных данных по механическим испытаниям сталей РСД32 и РСД32Ш показал, что их прочностные свойства, определенные на образцах Ø 6 мм, вырезанных поперек направления прокатки, совпадают при аналогичных условиях термической обработки.

Относительное удлинение (δ_s) и относительное сужение (ψ) для поперечных образцов из стали указанных марок вполне удовлетворительно как в исходном состоянии, так и в образцах.

Пластические характеристики этих сталей в направлении Z хотя и отличаются нестабильностью, но в определенной мере отвечают требованиям, предъявляемым к прокату. Применение термообработки сварных соединений с целью снятия остаточных сварочных напряжений снижает сопротивляемость материала сварного соединения развитию усталостных трещин и прочностные свойства сталей РСД32Ш на 100 МПа. С целью снижения степени ослабления границ кристаллитов в процессе термообработки целесообразно сокращение пребывания металла при повышенных температурах. Длительность отпуска необходимо сохранить до 1 ч при повышении температуры отпуска до 630 ± 20 °С.

Кроме того, желательно увеличение скорости охлаждения металла до 160° с/ч в диапазоне температур (630 – 800 °С). Высокий уровень значений предела текучести и временного сопротивления разрыву металла сварных соединений, выполненных ручной сваркой, связано с существенным превышением предельно допустимой нормы содержания углерода в металле шва, что отрицательно может сказаться на трещиностойкости соединения в целом.

Для устранения указанного недостатка целесообразно применение ручной сварки электродами марки УОНИ-13/55. Применение такого электрода может способствовать обеспечению условия равнопрочности основного металла и металла шва. Применение автоматической сварки устраняет указанные недостатки. Полученные данные механических свойства сварных соединений, конечно, недостаточны для применения конструкций в условиях эксплуатации в морской воде.

Для того чтобы сделать вывод о пригодности сварных соединений из стали РСД32 и РСД32Ш, необходимо получить информацию об их коррозионном поведении в данной среде. Низколегированные высокопрочные стали в основном применяются для строительства судовых конструкций, для которых характерны особые условия эксплуатации, поэтому необходимо учитывать не только их механические, но и физико-химические свойства.

Выводы

1. Подвергшиеся хрупкому разрушению образцы показали сопротивление до коррозии в морской воде 38400 Н, после коррозии 36220 Н, а в зоне периодического смачивания морской водой 31500 Н. Установлено, что коррозионное воздействие в морской воде ухудшает пластичность сварных соединений, при этом низкая пластичность наблюдается в зоне периодического смачивания морской водой.

2. Для снижения степени ослабления границ кристаллитов сварного шва в процессе термообработки целесообразно сокращение пребывания металла при повышенных температурах. При повышении температуры отпуска до 630 ± 20 °С длительность отпуска необходимо сократить до одного часа.

3. Для повышения сопротивления хрупкому разрушению сварных соединений судовых конструкций до и после коррозии и устранения указанных недостатков рекомендуется применение автоматической сварки под слоем флюса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sharifov Z. Z. Methods of increasing of the resistance to corrosion of the powder materials / Z. Z. Sharifov // 2-nd Chemical Engineering Conference for Collaborative Research in Eastern Mediterranean, Ankara, Turkey, 20-24 may 2001. — 2001. — 2 p.
2. Sadawy M. M. Influence of heat treatment on the corrosion and electrochemical behavior of austenitic stainless steel type (14X17H11Г) / M. M. Sadawy, T. I. Shirinov, R. Q. Heseinov [et.] // Tenth international conference. — Cairo, Egypt: Al Azhar University, 2008. — Pp. 7–11.

3. *Sadawy M. M.* Corrosion and electrochemical behavior of austenitic-ferritic stainless steel in Sulfuric acid solutions / M. M. Sadawy, R. Q. Heseinov, T. I. Shirinov // “Neftin,qazın geotexnoloji problemləri və kimya” ETŞ Elmi əsərləriç Bakıç. — 2009. — Pp. 327–332.
4. *Sharifov Z. Z.* Ways of Increase of corrosion resistance provider materials / Z. Z. Sharifov // Journal of Metallurgy. — 2002. — Vol. 8. — Is. 2. — Pp. 7.
5. *Sharifov Z. Z.* Improvement of a corrosion stability of composite materials on the ferrum’s base. International valium of scientific lab our / Z. Z. Sharifov // Progressive Technology and Machine building systems. — 2002. — Is. 19. — Pp. 7.
6. *Ширинов Т. И.* Коррозионно-электрохимическое поведение термообработанных аустенитных нержавеющей сталей в различных кислотах / Т. И. Ширинов, Р. К. Гусейнов, Мосаад Мохаммед // AzTU, professor-müəllim heyətinin və aspirantların 54-jü elmi-texniki və tədris-metodiki konfransı, məruzə materialları, I hissə, Bakı-2009. — 2009. — С. 313–314.
7. *Sadawy M. M.* Effect of Alloying Elements on the Corrosion and Electrochemical Behavior of Stainless Steel in Hydrochloric Acid solition / M. M. Sadawy, R. Q. Heseinov, T. I. Shirinov // Egyptian Second International Conference in chemistry (The 18th Egyptian Chemical Conference). — Hurghada, Egypt, 2009. — Pp. 12–20.
8. *Sadawy M. M.* The effect of heat treatment on the corrosion and electrochemical properties of ferric-austenitic stainless steel in sulfuric acid soluteon / M. M. Sadawy, T. I. Shirinov, R. Q. Heseinov // Труды международного форума «Наука и инженерное образование без границ». — Алма-Аты: Казахский национальный технический университет имени К. И. Сатпаева, 2009. — Т. 1. — С. 496–499.
9. Пат. 2167954 Российская Федерация, МПК C22C 38/60 (2000.01). Конструкционная сталь / Шарифов З. З., Гусейнов Р. К., Насибов А. Г., Мамедов В. М.; Заявитель и Патентообладатель Азербайджанский технический университет (AZ). — № 98109674/02. Заявл.: 19.05.1998; опубл. 27.05.2001. Бюл. № 15.
10. *Баширов Ф. Р.* Коррозионное поведение сварных соединений из стали РСД32 в каспийской морской воде / Ф. Р. Баширов // Вестник МГУ. Серия: судостроение и судоремонт. — 2014. — № 64. — С. 5.

RESISTANCE TO BRITTLE FRACTURE METAL SHIP CONSTRUCTIONS AND THEIR WELDED JOINTS AT TESTING THE IMPACT STRENGTH BEFORE AND AFTER OF CORROSION

The results of studies of ship steels and their welded joints in brittle resolution before and after corrosion in sea water. It is shown that when tested in sea water greatly deteriorates the ductility of welded joints of ship steel. In the area of seawater samples show intermediate results. The test results on the impact strength of the brand styles РСД32 rolled 50 mm showed that at sub-zero temperatures greatness toughness have the lowest values. However, the steel toughness РСД32Ш value depending on the temperature are slightly different in nature. For example, some samples have lower toughness values at temperatures between 0 and -20°C than at -40 ÷ + 6 °C. Study of resistance to brittle fracture of welded joints of steel РСД32 tested in different conditions of immersion in sea water for 6 months showed that all tested samples allow the bending angle of 30-35 degrees. Increasing the carbon content in the weld significantly increases yield strength and ultimate tensile strength of weld metal made by manual welding. It is determined that the corrosive effects of seawater welds deteriorates ductility, the ductility is observed in the low area of seawater.

Key words: brittle failure, ship constructions, welded joint, impact bending, corrosion.

REFERENCES

1. Sharifov, Z. Z. “Methods of increasing of the resistance to corrosion of the powder materials.” 2-nd Chemical Engineering Conference for Collaborative Research in Eastern Mediterranean, Ankara, Turkey. 2001: 2 p.
2. Sadawy, M. M., T. I. Shirinov, R. Q. Heseinov, H. M. Tahirli, and E. M. Akperov. “Influence of heat treatment on the corrosion and electrochemical behavior of austenitic stainless steel type (14X17H11Г).” Tenth international conference. Cairo, Egypt: Al Azhar University, 2008: 7–11.
3. Sadawy, M. M., R. Q. Heseinov, and T. I. Shirinov. “Corrosion and electrochemical behavior of austenitic-ferritic stainless steel in Sulfuric acid solitions.” “Neftin,qazın geotexnoloji problemləri və kimya” ETŞ Elmi əsərləriç Bakıç. 2009: 327–332.

4. Sharifov, Z. Z. "Ways of Increase of corrosion resistance provider materials." *Journal of Metallurgy* 8.2 (2002): 7.
5. Sharifov, Z. Z. "Improvement of a corrosion stability of composite materials on the ferrum's base. International valium of scientific lab our." *Progressive Technology and Machine building systems* 19 (2002): Pp. 7.
6. Shirinov, T. I., R. K. Gusejnov, and Mosaad Mohammed. "Korrozionno-jelektrohimicheskoe povedenie termoobrabotannyh austenitnyh nerzhavejushhih stalej v razlichnyh kislotah." *AzTU, professor-müəllim heyətinin və aspirantların 54-jü elmi-texniki və tədris-metodiki konfransı, məruzə materialları, I hissə, Bakı-2009*. 2009: 313–314.
7. Sadawy, M. M., R. Q. Heseinov, and T. I. Shirinov. "Effect of Alloying Elements on the Corrosion and Electrochemical Behavior of Stainless Steel in Hydrochloric Acid solition." *Egyptian Second International Conference in chemistry (The 18th Egyptian Chemical Conference)*. Hurghada, Egypt, 2009: 12–20.
8. Sadawy, M. M., T. I. Shirinov, and R. Q. Heseinov. "The effect of heat treatment on the corrosion and electrochemical properties of ferric-austenitic stainless steel in sulfuric acid soluteon." *Trudy mezhdunarodnogo foruma «Nauka i inzhenernoe obrazovanie bez granic», Vol.1*. Alma-Aty: Kazahskij nacionalnyj tehničeskij universitet imeni K.Iju.Satpaeva, 2009: 496–499.
9. Sharifov, Z. Z., R. K. Gusejnov, A. G. Nasibov, and V. M. Mamedov. Konstrukcionnaja stal. Russian Federation, assignee. Patent 2167954. 27 May 2001.
10. Bashirov, F. R. "Korrozionnoe povedenija svarnyh soedinenij iz stali RSD32 v kaspiskoj morskoy vode." *Vestnik MGU. Serija sudostroenie i sudoremont* 64 (2014): 5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шарифов Захид Зиядхан оглы —
доктор технических наук, профессор.
Азербайджанская Государственная
Морская Академия
science-asma@rambler.ru
Ханкишиев Исаг Абузар оглы — аспирант.
Научный руководитель:
Шарифов Захид Зиядхан оглы.
Азербайджанская Государственная
Морская Академия
isaq_x@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sharifov Zahid Ziyadkhan —
Dr. of Technical sciences, professor.
Azerbaijan State Marine Academy
science-asma@rambler.ru
Khankishiev Isag Abuzar — postgraduate.
Supervisor:
Sharifov Zahid Ziyadkhan.
Azerbaijan State Marine Academy
isaq_x@mail.ru

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2015 г.

УДК 629.5.03: 632.151

**К. Н. Сахно,
А. С. Дьяков,
Ч. К. Во**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПО ПРОЕКТНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ

Рассматриваются проблемы изготовления и монтажа труб по проектной информации. Проведён анализ регламентированных, стандартных допусков на изготовление труб и определено их влияние на отклонение трасс трубопроводов при монтаже. Выявлены причины, способствующие отказу от технологии изготовления труб по проектной документации методом гибки. Дано обоснование применения заводами более затратной технологии изготовления труб из фасонных частей. Предложена новая технология установки приварных соединений на трубы, устраняющая причины отказа от технологии изготовления труб методом гибки. Поставлены задачи исследования компенсационных возможностей трасс трубопро-

водов с учетом особенностей их конфигурации. Приводится краткое описание разработанной компьютерной программы, являющейся инструментом методики выпуска проектной документации (карт-эскизов) на трубы, позволяющей применить новую технологию установки соединений.

Ключевые слова: изготовление труб, допуски, гибка, проектирование, угловые погрешности.

В НАСТОЯЩЕЕ время особую актуальность приобретают технологии, позволяющие обеспечить импортозамещение на максимально возможном уровне. Современные инжиниринговые центры в указанном направлении ориентированы в основном на использование зарубежных научно-технических решений и инновационных технологий. При этом большинство из них изначально основаны на достижениях Советского Союза в период 60 – 70-х гг. прошлого века, когда гибка труб стала осуществляться по картам-эскизам, без шаблонов, что дало возможность изготавливать трубы в задел. Предполагалось, и не без оснований, что это сократит сроки строительства заказов и даст возможность создания региональных центров по изготовлению труб для стабильной загрузки трубогибочного оборудования. В процессе внедрения, предприятия начали отказываться от глобального применения данной технологии из-за большого процента брака. При монтаже трассы натыкались на смежные конструкции и не укладывались в выделенные коридоры [1]. Причины брака объясняли некачественным проектированием. В дальнейшем, с внедрением проектирования, использующего 3D-модели, оправдать брак неточностью проектирования стало невозможно, однако трубы, изготовленные в задел, продолжали при монтаже не помещаться в выделенный коридор [2], [3].

Рассмотрим причины такого положения дел.

Анализ регламентированных, стандартных допусков на изготовление труб и их влияние на отклонение трасс трубопроводов при монтаже

Существующая нормативная документация на изготовление труб по эскизам (в задел) регламентирует контроль двух параметров — это отклонение строительных размеров трубы и угол неперпендикулярности установки соединений относительно осей концевых участков. В процессе формирования конфигурации трубы на трубогибочном станке выполняется несколько операций — это продвижение до начала погиба, непосредственно погиб и разворот трубы для выполнения последующего погиба в нужной плоскости. Погрешности двух последних операций приводят к угловым отклонениям направлений прямых участков трубы, в том числе и концевых участков. Контроль этих отклонений существующими стандартами не регламентируется. Установка соединений с контролем перпендикулярности относительно осей концевых участков не уменьшает угловые отклонения, а только добавляет новые хаотичного направления. Контроль линейных размеров не выявляет эти угловые отклонения. Действие этих отклонений проявляется в процессе монтажа труб, когда трасса трубопровода отклоняется в непредсказуемых направлениях [4] – [6]. Допуски на отклонение конструктивных размеров труб регламентированы [7] и составляют ± 10 мм для труб диаметром меньше 100 мм и ± 15 мм для труб большего диаметра. Кроме допусков на конструктивные размеры трубы регламентируются допуски на неперпендикулярность установки соединений. Они регламентируются табл. 17 [8] в зависимости от диаметра труб, либо $0,5^\circ$ (европейский стандарт).

Рассмотрим, что может произойти при монтаже трассы, состоящей всего из двух труб, если трубы были изготовлены в соответствии с требованиями стандартов (рис. 1).

Трасса состоит из труб Ду65. Допуск на неперпендикулярность установки плоскости соединения с осью трубы 2/100, где 2 мм соответствует допуску для труб диаметром меньше 100 мм по табл. 17 [8], а 100 мм — это диаметр соединительной поверхности фланца Ду65. Линейные допуски на конструктивные размеры для труб Ду65 ± 10 мм [7]. В результате максимально допустимые отклонения трассы на конце первой трубы по оси Y составят: $10 + 2 / 100 \cdot 2000 = 50$ мм.

Это отклонение только этой трубы, однако второе соединение на первой трубе тоже может быть установлено не перпендикулярно в пределах допуска, что добавит отклонение второй трубе к ее 50 мм, еще $2 / 100 \cdot 2000 = 40$ мм. Итого общее отклонение трассы составит: $10 + 2 / 100 \cdot 2000 + 2 / 100 \cdot 2000 + 10 + 2 / 100 \cdot 2000 = 140$ мм. Если взять допустимый угол неперпендикулярности $0,5^\circ$ (европейский стандарт), то это даст на каждом фланце по 17,5 мм: $\sin 0,5 \cdot 2000$. Всего $10 + 17,5 + 10 + 17,5 = 72,5$ мм.

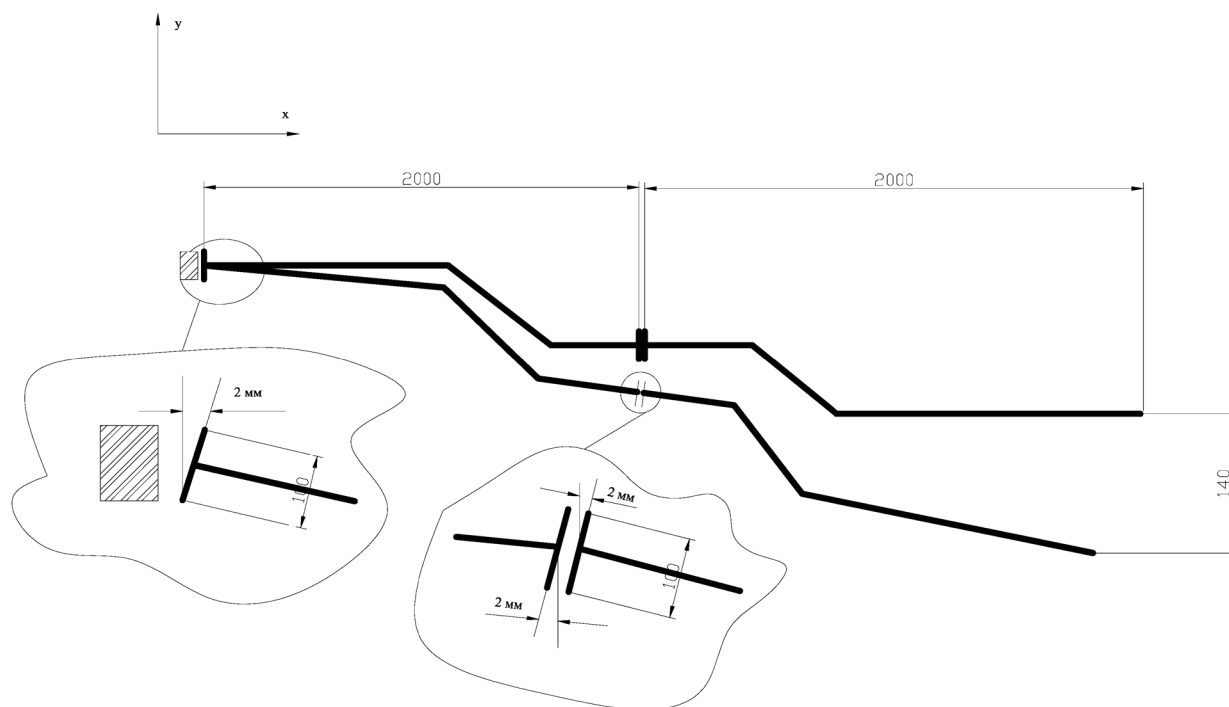


Рис. 1. Схема отклонений трассы после монтажа двух труб, изготовленных с разрешенными допусками

Конечно, это максимальный, а не практический вариант отклонений, однако в этой схеме не показаны угловые отклонения, образующиеся при гибке у прямых участков труб. При стандартных погрешностях выполнения операций погиба и разворота в $0,5^\circ$, два погиба и один разворот в каждой трубе дадут дополнительные отклонения такого же порядка. Трубы, изготовленные по чертежам с такими регламентированными допусками, не удастся смонтировать. Трасса не поместится в коридор, выделенный для нее в проекте.

Причины отказа от технологии изготовления труб по проектной документации методом гибки и обоснование применения заводами более затратной технологии изготовления труб из фасонных частей

Проведенный анализ показывает, что наибольшие отклонения образуются угловыми погрешностями [1]. В настоящее время в зарубежном судостроении широко применяется метод изготовления труб из фасонных частей. Технология, использующая для изготовления труб фасонные части, появилась в нашей стране в процессе выполнения зарубежных заказов. Технология формирования труб из фасонных частей — это более затратная технология. По сравнению с гибкой труб, на каждый изгиб трубы, кроме самой фасонной части, добавляется два сварных шва со своей дополнительной трудоёмкостью и сварочными материалами.

Однако технология формирования конфигурации труб из фасонных частей позволяет исключить угловые отклонения концевых участков и проконтролировать отсутствие этих отклонений довольно простыми измерениями [9]. Это преимущество определило применение данной технологии в проектах отечественных судов. При исключении угловых отклонений была устра-

нена главная проблема, стоявшая на пути возможности изготовления труб в задел, что привело к широкому внедрению изготовления труб с использованием фасонных частей. Для изготовления фасонных частей не нужно знать конфигурацию конкретных труб, поэтому они стали поставляемыми изделиями, и их можно покупать (в основном за рубежом). Так поступали в ОАО «Астраханское Судостроительное Производственное Объединение» (АСПО) при строительстве ледостойкой стационарной платформы проекта ЛСП-1, хотя предприятие располагает обширным парком трубогибных станков.

Возможность исключения угловых отклонений явилось главным фактором внедрения более затратной технологии изготовления, что сохранило технологию изготовления труб в задел. Если решить задачу учета и компенсации угловых отклонений, возникающих при гибке труб, то необходимость применения более затратной технологии изготовления труб из фасонных частей теряет смысл. Трубы можно будет изготавливать в задел, что также увеличит равномерную загрузку не только трубогибных станков, но и всего парка оборудования трубопроводного производства.

Технология установки приварных соединений на трубы, устраняющая причины отказа от изготовления труб методом гибки

В результате проведенных на рубеже XX – XXI вв. исследований предлагается технология изготовления труб, использующая трубогибные станки, исключая влияние угловых погрешностей трубы на отклонения, возникающие в процессе монтажа трасс трубопроводов [1], [4] – [6], [10]. Технология основана на анализе конфигурации трубы и данных по погрешностям выполнения отдельных операций оборудованием для изготовления трубы — это резка, гибка, продвижение, разворот в плоскости. В технологии используется изобретение, касающееся установки соединений. Проводится анализ конфигурации трубы на предмет возможных отклонений, которые могут возникнуть в процессе ее изготовления, и предлагаются варианты установки соединений по новой технологии, при выборе одного из которых будут компенсированы отклонения в двух координатных направлениях [11].

Труба, изготовленная по этой технологии, при монтаже в трассу трубопровода не даст никаких угловых отклонений. Кроме этого, конструктивные размеры трубы будут иметь отклонение только в одном координатном направлении. У 86 % труб это направление можно выбирать в процессе трассировки трубопровода из предлагаемых вариантов. У 68 % труб — это два варианта, у 18 % — все три направления координат. Выбирая направление из предложенных вариантов, можно исключить линейные отклонения трассы в нежелательных направлениях. У оставшихся 14 % труб определяется то единственное направление отклонения, за счет которого отклонения в направлении двух других осей координат также будут компенсированы [1], [10] – [12].

Краткое описание разработанной компьютерной программы, являющейся инструментом методики выпуска проектной документации (карт-эскизов) на трубы, позволяющей применить новую технологию установки соединений

Для использования предлагаемой технологии разработана компьютерная программа (рис. 2), использующая в расчетах данные по конфигурации трубы, заданные в координатных осях (точки перегиба), а также данные по погрешностям выполнения отдельных операций оборудованием для изготовления труб: резка, гибка, продвижение, разворот в плоскости. Эта программа и осуществляет весь анализ конфигурации трубы и возможные варианты установки соединений.

В предлагаемой технологии производства трубопроводов, направленной на увеличение объема труб, изготавливаемых в задел по проектной документации, необходимо участие проектной организации. Проектант выбирает подходящий, для безопасного отклонения трассы, вариант и записывает его в документ на изготовление трубы (чертеж или эскиз трубы).

На рис. 2 приведена последняя, выходная форма программы — результаты анализа конфигурации и размеров трубы на предмет ее компенсационных возможностей для компенсации отклонений образующихся после операции гибки трубы.

Файл Настройки О программе

Выбор чертежа/трубы

Обозначение чертежа: 362548.23.002

Обозначение трубы: 3/В4А

Добавить Переименовать Удалить

Текущая труба

Количество прямых участков: 5
Дата создания: 27.01.2014 14:01:51
Дата изменения: 27.01.2014 14:04:33
Текущий радиус: 63,6900551499

Координаты и отклонения

После гибки:	Экстремумы перемещения конца трубы, до совпадения с осью координат:	Экстремумы перемещения конца трубы, при сборке:
x=9,09	x=51	x=43,9
y=6,57	y=25,06	y=5,52
z=21,23	z=63,72	z=52,34

Радиус: 63,69

Затрачено на вычисления : 0,2 сек.

☐ Сохранить отчет

Считать

Рис. 2. Главная форма, после расчетов

Проектант должен выбирать для компенсации ту ось координат, отклонение по которой при монтаже трубы отклонит трассу в безопасном направлении. Для осуществления этого выбора в выходной форме приводятся три раздела. В разделе «После гибки» показаны максимальные отклонения, которые могут возникнуть после гибки заготовки. В разделе «Экстремумы перемещения конца трубы, до совпадения с осью координат» показана величина перемещения второго конца трубы, относительно первого до совпадения с каждой осью координат. В разделе «Экстремумы перемещения конца трубы, при сборке» показаны максимально допустимые величины перемещения соединения вдоль каждой оси координат до совмещения с трубой, после того как конец трубы был совмещён с этой осью.

После выбора направления компенсации в чертеж данной трубы вносится указание о перемещении конца трубы, при установке соединений именно до совпадения с выбранной осью координат, и величина перемещения соединения, указанная в форме расчета у этой оси. Данная величина является единственным допуском конструктивных размеров трубы. Никакие другие вычисления программы в чертеже не нужны и не вносятся. Яркий или приглушённый тон изображения результатов расчётов подсказывает, какие из осей координат могут быть использованы в качестве компенсационных. У приведенной в примере трубы любая ось координат может быть использована в качестве компенсационной. В расчете в качестве примера приведена реальная труба проекта 4550, построенного на ОАО «Судостроительный завод «Красные Баррикады».

Выводы

Изготовленные по таким чертежам и предлагаемой технологии трубы будут иметь отклонения своих конструктивных размеров только в одном координатном направлении, выбранном проектантом с учетом условий размещения трассы трубопровода, которому принадлежат трубы.

С помощью данной технологии проектант может выпустить такую документацию на изготовление труб, по которой можно изготовить трубы, не дающие никаких отклонений трассы. Отклонения трассы будут возникать только от неточности установки приварного насыщения и оборудования.

На основе данной технологии была создана программа повышения квалификации инженерных кадров «Современные методы проектирования и производства трубопроводов сложных технологических комплексов», которая выиграла конкурс, объявленный Указом Президента РФ. В соответствии с этой программой в III квартале 2013 г. было проведено повышение квалификации инженерных работников судостроительных и проектных организаций в составе 15 человек.

Данная технология может использоваться при создании сложных технологических комплексов: современных морских и речных судов, нефтегазоперерабатывающих сооружений, буровых платформ, любых объектов, в составе которых есть не прямые трубы.

Применение данной технологии изготовления труб открывает возможности решения многих современных проблем:

- импортозамещение (исключение приобретения фасонных частей, необходимых для изготовления труб);
- подготовка высококлассных специалистов на основе отечественной научной и инженерной мысли;
- изготовление труб по проектной документации без уточнения размеров «по месту»;
- сокращение сроков строительства объектов за счёт увеличения изготовления труб «в задел»;
- повышение конкурентоспособности за счёт снижения сроков выполнения заказов;
- увеличение загрузки существующего оборудования для изготовления труб;
- создание и развитие региональных центров изготовления труб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахно К. Н. Современные методы проектирования, изготовления и монтажа трубопроводов судовых систем / К. Н. Сахно, А. С. Дьяков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 1. — С. 26–32.
2. Соколов О. Г. Применение информационных технологий при создании судостроительной продукции / О. Г. Соколов, А. М. Плотников, Г. В. Багаев [и др.] // Судостроение. — 2004. — № 5. — С. 78–83.
3. Ганов Э. В. Применение ЭВМ для выполнения чертежей и подготовки производства изготовления судовых трубопроводов / Э. В. Ганов, И. А. Смирнова // Судостроение. — 2003. — № 5. — С. 51–52.
4. Дойхен К. М. Патент № 2126760 РФ. Способ изготовления магистральной трубы по аналитической информации. [Электронный ресурс] / К. М. Дойхен, Л. Б. Чмутов. — Режим доступа: <http://ru-patent.info/21/25-29/2126760.html> (дата обращения: 03.11.2015).
5. Сахно К. Н. Патент № 2473832 РФ. Способ компенсации отклонений при монтаже трубопроводных систем. [Электронный ресурс] / К. Н. Сахно. — Режим доступа: <http://ru-patent.info/24/73/2473832.html> (дата обращения: 03.11.2015).
6. Горелик Б. А. Бессварной гибкий и равнопрочный трубопровод / Б. А. Горелик. — СПб.: Морской регистр, 2006. — 138 с.
7. ОСТ 5.95057-90. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов. — РТП НПО «Ритм». — 207 с.
8. РД 5Р.0005-93. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Требования к проектированию, изготовлению и монтажу труб по эскизам и чертежам с координатами трасс трубопроводов. — СПб.: ЦНИИТС.
9. McAllister E. W. Pipeline Rules of Thumb Handbook: A Manual of Quick, Accurate Solutions to Everyday Pipeline Engineering Problem / E. W. McAllister. — Burlington, Ma: Gulf professional publ., 2009. — 747 p.

10. Сахно К. Н. Разработка технологий изготовления и монтажа судовых трубопроводов и их экономическое обоснование / К. Н. Сахно // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 3. — С. 22–29.

11. Сахно К. Н. Научные основы проектирования трасс судовых трубопроводных систем / К. Н. Сахно // Судостроение. — 2009. — № 6. — С. 60–62.

12. Боровков В. М. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов промышленных предприятий: учеб. пособие / В. М. Боровков, А. А. Калютник, В. В. Сергеев. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. — 224 с.

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF PIPELINES PROJECT INFORMATION USING A WELDED PIPE JOINTS

There are problems of manufacture and installation of pipes for project information. The authors analyzed the regulated and standard of tolerances for the manufacture of tubes and their impact on the deviation of pipelines during installation. They further identified reasons contributing to the rejection of pipes manufactured according to the design documentation by bending. Given the rationale, there are more costs involved in the use of factories technologies for the manufacture of pipes from fittings. The new technology of the installation of welded connections on pipes helps to eliminate the causes of refusal from the production technology of pipe bending. The objective of the study is the compensatory abilities of pipelines taking into account features of their configuration. A brief description of the developed computer program, which tool methods were release on project documentation (maps, sketches) for pipes, allowing you to apply a new technology to establish connections.

Keywords: manufacture of tubes, tolerances, flexible, projecting, angular errors.

REFERENCES

1. Sakhno, K. N., and A. S. Diyakov. "Modern methods of designing, manufacturing and mounting of marine system pipelines." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2014): 26–32.

2. Sokolov, O. G., A. M. Plotnikov, G. V. Bagaev, V. A. Rogozin, and V. I. Kupershtein. "Use of information technologies during creation of shipbuilding products." *Sudostroenie* 5 (2004): 78–83.

3. Ganov, E. V. and I. A. Smirnova. "Application of PC for developing drawings and preproduction in manufacture of shipboard pipelines." *Sudostroenie* 5 (2003): 51–52.

4. Doykhen, K. M., and L. B. Chmutov. *Sposob izgotovleniya magistralnoy trubyy po analiticheskoy informatsii*. Russian Federation, assignee. Patent 2126760.

5. Sakhno, K. N. *Sposob kompensatsii otkloneniy pri montazhe truboprovodnykh system*. Russian Federation, assignee. Patent 2473832.

6. Gorelik, B. A. *Bessvarnoy gibkiy i ravnoprochnyy truboprovod*. SPb.: Morskoy registr, 2006.

7. Russian Federation. OST 5.95057-90. *Sistemy sudovyye i sistemy sudovykh energeticheskikh ustanovok. Tipovoy tekhnologicheskii protsess izgotovleniya i montazha truboprovodov*. RTP NPO «Ritm».

8. Russian Federation. RD 5P.0005-93. *Sistemy sudovyye i sistemy sudovykh energeticheskikh ustanovok. Trebovaniya k proyektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu trub po eskizam i chertezham s koordinatami trass truboprovodov*. SPb.: TSNIITS.

9. McAllister, E. W. *Pipeline Rules of Thumb Handbook: A Manual of Quick, Accurate Solutions to Everyday Pipeline Engineering Problem*. Burlington, Ma: Gulf professional publ., 2009.

10. Sakhno, K. N. "Development of ship pipeline mounting and manufacturing technologies and their economical substantiation." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2011): 22–29.

11. Sakhno, K. N. "Scientific foundations of marine pipeline systems designing." *Sudostroenie* 6 (2009): 60–63.

12. Borovkov, V. M., A. A. Kalyutik, and V. V. Sergeyev. *Izgotovleniye i montazh tekhnologicheskikh truboprovodov promyshlennykh predpriyatiy: ucheb. pos.* SPb.: Izdatelstvo Politekh. universiteta, 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахно Константин Николаевич —
Доктор технических наук, Профессор.
Астраханский государственный
технический университет
k.sakhno@mail.ru
Дьяков Артем Сергеевич — аспирант.
Научный руководитель:
Сахно Константин Николаевич.
Астраханский государственный
технический университет
rereac@mail.ru
Во Чунг Куанг — аспирант.
Научный руководитель:
Сахно Константин Николаевич.
Астраханский государственный технический
университет
votrungquang@yahoo.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sakhno Konstantin Nikolaevich —
Dr. of Technical Science, professor.
Astrakhan State Technical University
k.sakhno@mail.ru
Dyakov Artem Sergeyevich — postgraduate.
Supervisor:
Sakhno Konstantin Nikolaevich.
Astrakhan State Technical University
rereac@mail.ru
Vo Trung Quang — postgraduate.
Supervisor:
Sakhno Konstantin Nikolaevich.
Astrakhan State Technical University
votrungquang@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 3 октября 2015 г.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.432:621.45.026

О. К. Безюков,
О. В. Афанасьева,
А. А. Денисова

ПОСТРОЕНИЕ КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ СУДОВЫХ ТОПЛИВНЫХ РАСХОДОМЕРОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ

В статье рассмотрена методика формирования критерия оценки технического уровня судовых контрольно-измерительных приборов на основе методов теории подобия и анализа размерностей. Рассмотрены существующие подходы к оценке технического уровня и качества судовых энергетических установок (СЭУ), судовых дизельных двигателей и контрольно-измерительных приборов (КИП), применяемых в судовой энергетике. Рассмотрены этапы построения критерия технического уровня для расходомеров. Получено критериальное уравнение, состоящее из тривиального критерия подобия, представляющего отношение двух величин с одинаковой размерностью, и критерия подобия, составленного из величин различной физической природы и размерности. Применение критериального уравнения позволит провести отбор расходомеров, обладающих высоким техническим уровнем, что будет способствовать повышению энергоэффективности СЭУ через сокращение расхода топлива и выбросов парниковых газов. Это позволит достигнуть выполнения требований Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», Технических регламентов о безопасности морского и внутреннего водного транспорта, судового плана управления энергоэффективностью (SEEMP), предложенного Международной морской организацией.

Ключевые слова: технический уровень, качество, квалиметрическая оценка, контрольно-измерительный прибор, теория подобия и анализа размерностей, критерий технического уровня, топливные расходомеры, судовые двигатели внутреннего сгорания (ДВС), теплоэнергетическое оборудование.



ФЕДЕРАЛЬНАЯ целевая программа «Развитие гражданской морской техники на 2009 – 2016 годы» предусматривает:

- сокращение общего научно-технического и технологического отставания России от передовых стран в приоритетных направлениях развития морской техники;
- снижение номенклатуры и объемов поставок из ближнего и дальнего зарубежья судового комплектующего оборудования (СКО) путем создания новых отечественных технологий в сфере судового машиностроения и приборостроения, совершенствования и развития кооперации с учетом решения вопросов импортозамещения;
- повышение конкурентоспособности гражданской морской техники (ГМТ) для внутреннего рынка и расширение возможностей по поставке российской судостроительной продукции на экспорт.

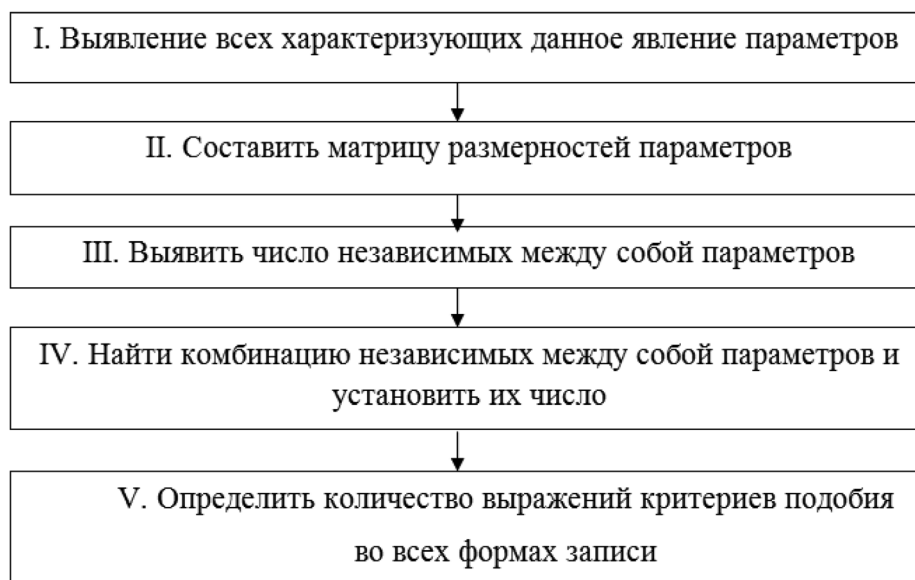
Эта задача может быть решена в полной мере только в том случае, если будет разработана методика оценки научно-технического уровня, качества и конкурентоспособности судов, продукции судового машиностроения, систем автоматизации, приборостроения и др. [1], [2].

В России еще в первом десятилетии XX в. академиком А. Н. Крыловым была разработана научно обоснованная методика количественного оценивания качества, с помощью которой была решена задача выбора лучших проектов военных кораблей по совокупности их основных свойств [3]. Существенный вклад в дальнейшее развитие методов оценки научно-технического уровня и качества внесла российская научная школа квалиметрии [3], [4], которой были определены ее общие методологические принципы, разработаны основы структуризации свойств, выбора и классификации показателей качества. В настоящее время ведутся работы по совершенствованию

существующих методов квалитетической оценки приборов и разработке новых методов [5] – [10]. В частности, предложены новые критерии эффективности (конструктивно-ценовой, габаритно-весовой, критерий комплексной устойчивости датчиков физических величин), которые удобно использовать при оценке приборов, о технических характеристиках которых нет достаточной информации. Однако описанные методы оценки качества основаны в значительной мере на использовании экспертиз, проведение которых для сотен, а иногда тысяч типов контрольно-измерительных приборов (только в России зарегистрировано свыше 4500 предприятий, имеющих права на производство и ремонт средств измерения) с постоянно меняющимися техническими характеристиками требует много времени и финансовых затрат, носит субъективный характер, и поэтому, чаще всего, не находит практического применения.

В 20 и 30-е гг. прошлого столетия были предложены аналитические (неэкспертные) методики оценки качества, преимуществами которых является малая трудоемкость, большая надежность итоговых результатов, а недостатками — относительная технологическая сложность разработки критериев и методик оценивания качества [3]. Упростить процесс оценки качества приборов можно на основе методов теории подобия и анализа размерностей [11], [12], которые используются для определения вида формул, выражающих зависимость между физическими величинами в изучаемых явлениях. Особенностью теории подобия и анализа размерностей является то, что они позволяют осуществлять замещение множества отдельных параметров совокупностью критериев, тем самым достигается увеличение степени общности полученного результата без потери содержащейся в ней информации.

Заметим, что теория подобия и анализ размерностей широко используются не только при исследовании газодинамики, теплообмена, но и при решении задач, связанных с прогнозированием ресурса работы механизма и её элементов, их безотказности, долговечности и безопасности, для анализа вибраций, определения технического уровня и качества судов, дизельных и газотурбинных двигателей [13] – [19]. В основе данного метода лежит π -теорема, которая даёт возможность определить количество критериев подобия, характеризующих конкретное явление и сводится к составлению и решению уравнений размерностей [11], [12], [17]. На рисунке представлен общий алгоритм получения критериев подобия методом анализа размерностей.



Алгоритм получения критериев подобия методом анализа размерностей [17]

Из алгоритма, представленного на рисунке, видно, что для определения критериев с помощью π -теоремы необходимо, прежде всего, выявить все те параметры $P_1, \dots, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k, \dots, P_s, \dots, P_m$, которые характеризуют данное явление, и, следовательно, установить их число, т. е.

$$\left. \begin{aligned} [P_1] &= [A_1^{\alpha_1} A_2^{\beta_1} \dots A_n^{\xi_1}]; \\ [P_2] &= [A_1^{\alpha_2} A_2^{\beta_2} \dots A_n^{\xi_2}]; \\ &\dots \\ [P_m] &= [A_1^{\alpha_m} A_2^{\beta_m} \dots A_n^{\xi_m}]. \end{aligned} \right\}$$

Дальше следует ряд последовательных этапов, а именно: составление матрицы размерностей параметров; выявление числа k независимых между собой параметров; нахождение комбинаций независимых между собой параметров и установление их числа, т. е. числа форм записи; определение выражений $m - k$ критериев подобия во всех формах записи.

Причём формирование матрицы размерностей (второй этап) производится на основе формул размерностей параметров $P_1, \dots, P_m$ в выбранной системе единиц измерения и имеет вид [17]

$$\|A\| = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \dots & \xi_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \dots & \xi_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_m & \beta_m & \dots & \xi_m \end{pmatrix}.$$

Третий этап, определение числа k независимых между собой параметров, сводится к нахождению ранга полной матрицы размерностей $\|A\|$, т. е. наибольшего порядка не равного нулю определителя, составленного из элементов строк данной матрицы. Если существует хотя бы один определитель порядка n , не равный нулю, то ранг матрицы $\|A\|$ и, соответственно, число независимых параметров $k = n$. Если же определители n -го порядка равны нулю, то $k < n$, и необходимо проанализировать на равенство нулю определители порядка $n - 1$, составленные из столбцов каждой из частичных матриц $\|B\|$ размеров $(n - 1) \times n$. Если среди определителей порядка $n - 1$ не существует определителей, не равных нулю, то $k < n - 1$, и необходимо продолжать анализ определителей порядка $n - 2$ и т. д.

На четвёртом этапе, т. е. при нахождении комбинаций независимых между собой параметров и установлении их числа, возможны два случая. Как известно, число независимых между собой параметров k может быть равно числу основных единиц или меньше числа n основных единиц ($k < n$). В случае, когда $k = n$, число форм записи $m - k$ критериев подобия соответствует количеству не равных нулю определителей k -го порядка, составленных из строк полной матрицы размерностей $\|A\|$. Если же $k < n$, то число форм записи равно количеству комбинаций, состоящих из k параметров, у которых ранг частичной матрицы $\|B\|$ размеров $k \times n$ равен k .

Определение выражений для $m - k$ критериев подобия в каждой из форм записи заключается в нахождении значений показателей степени $x_1, \dots, x_k, \dots, z_1, \dots, z_k$, которые являются отношениями вида, $D_{i,s} / D$ где D — определитель порядка k , составленный из размерностей независимых параметров, соответствующих данной форме записи; $D_{i,s}$ — определитель, полученный из D посредством замены i -й его строки на строку из размерностей s -го параметра.

После того как найдены значения $x_1, \dots, x_k$ и т. д., остаётся лишь записать отношения каждого из параметров $P_{k+1}, \dots, P_m$ к произведениям независимых между собой параметров $P_1, \dots, P_k$ в соответствующих степенях.

Рассмотрим методику построения критерия технического уровня топливных расходомеров, играющих существенную роль при оценке эффективности СЭУ [20], [21]. Основываясь на работе [16] под техническим уровнем будет понимать часть характеристики качества, которая может быть определена количественно, путем использования его основных технических параметров без привлечения экспертных оценок. Результаты анализа существующих методов оценки технического уровня расходомеров показывает, что наиболее обоснованным и часто применяемым является метод, основанный на анализе так называемых функциональных моделей, в математической форме описывающих взаимосвязь нескольких параметров объекта оценки с качеством его функционирования [16].

Основным нормативным документом по определению показателей качества расходомеров является ГОСТ 4.158-85 «Система показателей качества продукции (СПКП). Счетчики, дозаторы и расходомеры скоростные, объемные. Расходомеры электромагнитные. Расходомеры, дозаторы и дозирующие установки вихревые. Номенклатура показателей», который обеспечивает декомпозицию показателей качества, но не устанавливает в настоящее время их иерархию, что затрудняет получение строго научного и однозначного (количественного) определения технического уровня и качества судовых КИП (табл. 1).

Таблица 1

Номенклатура показателей качества расходомеров согласно ГОСТ 4.158-85

Наименование показателя качества	Размерность показателя качества	Наименование характеризуемого свойства
1	2	3
1. ПОКАЗАТЕЛИ НАЗНАЧЕНИЯ		
1.1. Пределы допускаемой основной погрешности (пределы допускаемой погрешности)	%	Метрологическое свойство
1.2. Пределы измерения	м/ч, м/с, л/ч	То же
1.3. Порог чувствительности	м/ч	»
1.4. Эксплуатационный расход	м/ч	»
1.5. Переходный расход	м/ч	»
1.6. Диаметр условного прохода	мм	Геометрический размер
1.7. Выходной сигнал	А, В	Функциональная возможность
1.8. Исполнения по устойчивости к окружающей среде		Работоспособность
1.9. Исполнения по устойчивости к механическим воздействиям		Работоспособность
1.10. Устойчивость к воздействию промышленных радиопомех		То же
1.11. Параметры измеряемой среды: давление	МПа (кгс/см ²)	Физическое свойство
температура	°С	
и другие	—	
1.12. Номинальная статическая характеристика (ГОСТ 8.009-84)	—	Метрологическое свойство
1.13. Дополнительные погрешности от воздействия внешних влияющих факторов	—	То же
1.14. Минимальный расход	м/ч	—
1.15. Номинальный расход	м/ч	—
1.16. Максимальный расход	м/ч	—
1.17. Наибольшее количество жидкости и газа за сутки, м	м	Работоспособность
1.18. Наибольшее количество жидкости и газа, измеренное в течение гарантийного срока	м	То же
1.19. Потеря давления при максимальном расходе	кПа (кгс/см)	—
1.20. Габаритные размеры	мм	Геометрические размеры
1.21. Установочные и присоединительные размеры	мм	То же
1.22. Материалы деталей, соприкасающихся с измеряемой средой	—	Долговечность
1.23. Параметры электрического питания (с допускаемыми отклонениями): напряжение	—	Функциональная возможность
частота	В Гц	
1.24. Предельное значение сопротивления нагрузки	Ом	То же
1.25. Емкость отсчетного устройства	м	»
1.26. Цена наименьшего деления отсчетного устройства	м	»

Таблица 1
(Продолжение)

2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ (ГОСТ 27.003-83)		
2.1. Нарботка на отказ или вероятность безотказной работы за время	ч	Безотказность
2.2. Средний срок службы	лет	Долговечность
2.3. Установленный срок службы, (срок службы)	лет	То же
2.4. Среднее время восстановления (для восстанавливаемых приборов)	ч	Ремонтопригодность
2.5. Установленная безотказная наработка	ч	Безотказность
3. ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ЭНЕРГИИ		
3.1. Масса прибора	кг	Экономичность расхода материалов
3.2. Потребляемая мощность	В, А	Экономичность расхода энергии питания
4. ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ (ГОСТ 16035-81)		
4.1. Соответствие прибора и его элементов размерам тела человека и его частей (удобство монтажа и обслуживания)	—	Эргономические свойства
4.2. Соответствие прибора силовым возможностям человека	—	То же
5. ЭСТЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ		
5.1. Функционально-конструктивная обусловленность	—	Рациональность формы
5.2. Тщательность покрытий и отделки, устойчивость к повреждениям	—	Совершенство производственного исполнения
6. ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ		
6.1. Трудоемкость изготовления (ГОСТ 14205-83)	нормо-ч	Эффективность использования трудовых ресурсов
6.1.1. Нормативная трудоемкость	нормо-ч	Эффективность использования трудовых ресурсов
6.1.2. Проектная трудоемкость	нормо-ч	То же
6.2. Энергоемкость изготовления	кВт·ч	Эффективность использования энергетических ресурсов
7. ПОКАЗАТЕЛИ ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОСТИ		
7.1. Устойчивость к механическим воздействиям в упаковке при транспортировании	—	Устойчивость к транспортированию
7.2. Устойчивость к воздействию температуры и влажности в упаковке при транспортировании	—	То же
8. ПОКАЗАТЕЛИ СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ		
8.1. Коэффициент применяемости по типоразмерам	%	—
8.2. Коэффициент применяемости по себестоимости (для серийно выпускаемых приборов)	%	—
8.3. Коэффициент повторяемости	%	—
9. ПАТЕНТНО-ПРАВОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ		
9.1. Показатель патентной чистоты	—	Техническая новизна
9.2. Показатель патентной защиты	—	Конкурентоспособность
10. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ		
10.1. Прочность и герметичность	кПа, МПа (кгс/см)	Безопасность
10.2. Электрическая прочность изоляции	В/м	То же
10.3. Сопротивление изоляции	МОм	То же

Реализация указанного на рисунке алгоритма осуществляется в следующей последовательности:

- определение основных физических параметров, характеризующих функционирование расходомера;
- составление формул размерностей физических параметров в выбранной системе измерения;
- построение матрицы размерности основных физических параметров;
- построение степенного одночлена, составленного из произведения первичных размерностей;
- составление системы уравнений для нахождения значений степеней физических параметров;
- получение безразмерного комплекса, характеризующего технический уровень расходомера.

Проанализируем основные технические характеристики, определяющие функционирование расходомеров.

Применительно к решаемой задаче, основываясь на результатах, представленных в работе [16], можно установить два иерархических уровня, разделив показатели, перечисленные в ГОСТе, на две группы. В первый, более высокий уровень будут входить технические показатели (1.1; 1.14 – 1.16; 2.1; 3.1) (см. табл. 1), характеризующие технический (научно-технический) уровень КИП, а во второй уровень — остальные показатели, влияние которых на качество определяется путем экспертизы (назначения соответствующих весовых коэффициентов). При этом обе группы совместно будут давать комплексную оценку качества КИП.

Основным функциональным параметром измерительных приборов является точность их работы, которая может оцениваться обратным значением модуля относительной погрешности, выраженной в процентах. При этом, чем меньше погрешность, тем выше технический уровень приборов [1].

Широкий диапазон измерения является важным достоинством расходомеров, так как расход топлива в диапазоне эксплуатационных режимов (от холостого хода до номинальной нагрузки) изменяется в десятки раз. Поэтому, чем шире диапазон измерения расхода, тем универсальнее прибор и тем выше его технический уровень.

Известно, что микроминиатюризация является одним из основных направлений развития приборостроения. Она обеспечивает существенное сокращение энергопотребления, повышение быстродействия, упрощение конструкции и расширение функциональных возможностей КИП. Поэтому чем ниже масса расходомера, тем выше его технический уровень.

Надежность измерительного прибора — это время, в течение которого прибор безотказно работает и показывает изначальную точность. Это зависит от производителя и модели (типа) расходомера и от условий его эксплуатации. Например, ротаметры финской компании *Kytola* рассчитаны на срок работы не менее десяти лет (см. Интернет-ресурс. Код доступа: <http://www.rotametr.ru/index.php?Content=235&Data=020220&menu=1>).

Надёжность измерительного прибора часто оценивается через наработку на отказ, выраженную в единицах времени и характеризующую среднюю продолжительность работы устройства между ремонтами. Поэтому чем больше наработка на отказ прибора, тем выше его технический уровень.

Таким образом, критерий технического уровня топливных расходомеров определяется следующими параметрами: предел допускаемой относительной погрешности, диапазон измерения расхода, масса первичного прибора, наработка на отказ.

Все физические величины, влияющие на технический уровень расходомера, можно разделить на первичные: масса m [кг], наработка на отказ T [с]; и вторичные: диапазон измерения расхода ΔG [кг/с]. Формулы размерности вторичных величин имеют вид степенных многочленов.

Построим безразмерный показатель технического уровня расходомера, по описанному алгоритму. Указанный безразмерный показатель в общем виде может быть записан следующим образом: $\pi = [A_1]^{z_1} \cdot [A_2]^{z_2} \cdot [A_3]^{z_3} \cdot [A_4]^{z_4}$,

где размерность величины $[A_i] = [L]^{\alpha_i} [M]^{\beta_i} [T]^{\varepsilon_i}$ ($[L]$ — размерность длины; $[T]$ — размерность времени; $[M]$ — размерность массы).

Показатели степени z_1, z_2, z_3, z_4 должны быть таковы, чтобы размерность π была равна нулю. В табл. 2 представлены степени размерностей, т. е. $\alpha_i, \beta_i, \varepsilon_i$.

Таблица 2

Таблица размерностей

Величина		Степени		
		$[L]$	$[M]$	$[T]$
A_1	М	$\alpha_1 = 0$	$\beta_1 = 1$	$\varepsilon_1 = 0$
A_2	Т	$\alpha_2 = 0$	$\beta_2 = 0$	$\varepsilon_2 = 1$
A_3	δ	$\alpha_3 = 1$	$\beta_3 = 0$	$\varepsilon_3 = 0$
A_4	G	$\alpha_4 = 0$	$\beta_4 = 1$	$\varepsilon_4 = -1$

Составим систему уравнений для нахождения z_1, z_2, z_3, z_4 :

$$\begin{cases} 0z_1 + 0z_2 + z_3 + 0z_4 = 0 \\ z_1 + 0z_2 + 0z_3 + z_4 = 0 \\ 0z_1 + z_2 + 0z_3 - z_4 = 0 \end{cases}$$

Тогда матрица размерностей будет иметь следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Система уравнений для нахождения z_1, z_2, z_3, z_4 имеет множество решений, но физически обоснованным является выражение (1).

$$TU_{\text{расходомера}} = \left[\frac{1}{\delta} \right]^{C_1} \cdot \left[\frac{\Delta G}{M} \cdot \Delta T \right]^{C_2}, \quad (1)$$

где δ — пределы допускаемой относительной погрешности, %; ΔG — диапазон измерения расхода ΔG , кг/с; M — масса первичного прибора (датчика, измерительной ячейки без вторичного показывающего прибора), кг; ΔT — наработка на отказ, с (ч); C_1 и C_2 — весовые коэффициенты (вычисляемые с помощью метода матричного исчисления недоопределённых матриц Гаусса).

Таким образом, получено критериальное уравнение, состоящее из тривиального критерия подобия, представляющего отношение двух величин с одинаковой размерностью, и критерия подобия, составленного из величин различной физической природы и размерности. Полученное критериальное уравнение инвариантно к физическим принципам функционирования приборов и поэтому может быть применено для определения технического уровня различных типов расходомеров. Остальные параметры, которые наряду с критерием технического уровня определяют качество расходомеров, могут быть проанализированы в соответствии с методикой, изложенной в работе [16].

Критериальное уравнение позволяет обеспечить выбор расходомеров, обладающих высоким техническим уровнем, что будет способствовать сокращению расхода топлива и выбросов парниковых газов судовыми энергетическими установками в соответствии с требованиями Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», Технических регламентов о безопасности морского и внутреннего водного транспорта, судового плана управления энергоэффективностью (SEEMP), предложенного Международной морской организацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безюков О. К. Методы оценки научно-технического уровня судов, энергетических установок и контрольно-измерительных приборов / О. К. Безюков, А. А. Денисова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 119–130.
2. Агеев В. И. Контрольно-измерительные приборы судовых энергетических установок: устройство, эксплуатация, эффективность. Справочник / В. И. Агеев. — Л.: Судостроение, 1985. — 416 с.
3. Азгальдов Г. Г. Квалиметрия для всех / Г. Г. Азгальдов, А. В. Костин, В. В. Садов. — М.: ИД «ИнформЗнание», 2012. — 165 с.
4. Андрианов Ю. М. Квалиметрия в приборостроении и машиностроении / Ю. М. Андрианов, А. И. Субетто. — Л.: Машиностроение (Ленингр. отд.), 1990. — 223 с.
5. Зубков А. Ф. Синтез и анализ моделей качества датчиков физических величин / А. Ф. Зубков, М. А. Чернецов, Р. В. Рыжов // Нива Поволжья. — 2012. — № 3. — С. 36–40.
6. Мамедов Ф. И. Анализ энергетических показателей электромагнитного датчика малых линейных перемещений / Мамедов Ф. И., Дадашева Р. Б., Гусейнов Р. А. [и др.] // Метрология. — 2010. — № 11. — С. 30–37.
7. Михайлов П. Г. Разработка моделей качества датчиков физических величин / П. Г. Михайлов, М. А. Чернецов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». — 2011. — Т. 2. — С. 278–280.
8. Михайлов П. Г. Синтез моделей качества датчиков для мониторинга состояния здоровья человека / П. Г. Михайлов, А. С. Митрохин // Датчики и системы. — 2011. — № 10. — С. 21–25.
9. Свинолупов Ю. Г. Методика оценки качества измерительных процессов (на примере датчиков давления) / Ю. Г. Свинолупов, В. А. Корнев, В. К. Кулешов // Дефектоскопия. — 2012. — № 2. — С. 73–82.
10. Цибизов П. Н. Разработка моделей датчиков физических величин на основе квалиметрического подхода / П. Н. Цибизов, П. Г. Михайлов, Т. В. Астахова, Д. А. Тютюников // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. — № 5 (130). — С. 99–104.
11. Бриджмен П. В. Анализ размерностей / П. В. Бриджмен. — М.: Наука, 2001. — 148 с.
12. Хантли Г. Анализ размерностей / Г. Хантли. — М.: Мир, 1970. — 176 с.
13. Афромеев Э. А. Критерии технического совершенства судов / Э. А. Афромеев // Судостроение. — № 6. — 2005. — С. 14–17.
14. Гусейнов М. Р. Обоснование выбора критериев эффективности транспортных судов / М. Р. Гусейнов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2010. — Т. 18. — № 3. — С. 89–95.
15. Малый П. А. Принципы определения качества и технического уровня грузовых транспортных судов / П. А. Малый // Труды ЛИВТ «Теория, проектирование и техническая эксплуатация судов речного флота». — 1970. — № 127. — С. 87–92.
16. Безюков О. К. Методика формирования карты технического уровня и качества судовых дизелей / О. К. Безюков, И. В. Ивашин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 1. — С. 77–86.
17. Афанасьева О. В. Вибродиагностирование технического состояния судовых дизелей по критериям подобия: дисс. ... канд. техн. наук / О. В. Афанасьева. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2004. — 196 с.
18. Безюков О. К. Критерии технического уровня основных элементов судовых газотурбинных двигателей / О. К. Безюков // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление», 1–2 октября 2009 г. Кн. II. — СПб.: СПГУВК, 2010. — С. 113–122.
19. Безюков О. К. Критерий для оценки научно-технического уровня судовых дизелей / О. К. Безюков // Труды междунар. науч.-техн. семинара «Исследования, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». — СПб.: Изд-во «ПаркКом», 2006. — С. 16–19.
20. Максимец А. В. Измерение расхода топлива судовыми дизелями ультразвуковым методом в условиях эксплуатации: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. В. Максимец. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2004. — 21 с.
21. Орлов А. Е. Методика определения расхода топлива и эффективной мощности судового ДВС в условиях эксплуатации: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. Е. Орлов. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2009. — 21 с.

TECHNICAL LEVEL'S CRITERIA FOR SHIP FUEL GAUGE CONSTRUCTION USING THE METHOD OF DIMENSIONAL ANALYSIS

The article describes the method criterion of evaluation of the technical level of marine instrumentation forming, based on the methods of similarity theory and dimensional analysis. The existing approaches to the evaluation of the technical level and quality of SPP, marine diesel engines and instrumentation (instrumentation), used in the ship's power. The stages of the construction of the criterion of technical-level flow. An criterion equation consisting the trivial similarity criterion, which is the ratio of two quantities of the same dimension and similarity criterion, composed of various physical quantities and dimensions. Application criteria equations allow for the selection of flowmeters with high technical level that will enhance the energy efficiency of the ship's power plant by reducing fuel consumption and greenhouse gas emissions. This will achieve the fulfillment of the requirements of the Federal Law № 261-FZ "On energy saving and energy efficiency," technical regulation on safety of maritime and inland waterway transport, ship energy efficiency management plan (SEEMP), proposed by the International Maritime Organization.

Keywords: technical level, quality, qualimetry check, similarity theory and dimensional analysis, the criterion of the technical level, fuel flow, marine ICE and heat power equipment.

REFERENCES

1. Bezyukov, O. and A. Denisova. "Methods of evaluation of scientific and technological level of the courts, energetic installations and instrumentation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 119–130.
2. Ageev, Vladimir. *Kontrolno-izmeritelnye pribory sudovyh jenergeticheskikh ustanovok: ustrojstvo, jekspluatacija, jeffektivnost: spravocnik*. L.: Sudostroenie, 1985.
3. Azgaldov, Garry, A. Kostin, and V. Sedov. *Kvalimetrija dlja vseh*. M.: ID InformZnanie, 2012.
4. Andrianov, Yuri, and A. Subetto. *Kvalimetrija v priborostroenii i mashinostroenii*. L.: Mashinostroenie, Leningr. Otd., 1990.
5. Zubkov, A., M. Tchernetsov, and R. Ryzhov. "Synthesis and analysis of models as sensors of physical quantities." *Niva Povolzhya* 3 (2012): 36–40.
6. Mamedov, F. I., R. B. Dadasheva, R. A. Gusejnov, Sh. T. Mamedov, and K. F. Asadova. "The analysis of power indicators of the electromagnetic gage of small linear movements." *Metrology* 11 (2010): 30–37.
7. Mihajlov, P. G., and M. A. Chernecov. "Razrabotka modelej kachestva datchikov fizicheskikh velichin." *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* 2 (2011): 278–280.
8. Mikhailov, P., and A. Mitrokhin. "Synthesis and analysis of models of quality sensor for monitoring the status of human health." *Datchiki & Systemi* 10 (2011): 21–25.
9. Svinolupov, Y., V. Kornev, and V. Kuleshov. "Methods of assessing the quality of the measurement process (at least when, pressure sensors)." *Defektoscopy* 2 (2012): 73–82.
10. Tsibizov, A., P. Mikhailov, T. Astakhov, and C. Tyutyunov. "Modelling sensors based approach qualimetric." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 5 (2012): 99–104.
11. Bridzhmen, P. V. *Analiz razmernostej*. M.: Nauka, 2001.
12. Hantli, G. *Analiz razmernostej*. M.: Mir, 1970.
13. Aframeev, E. A. "Vessels technical perfection criterion." *Sudostroenie* 6 (2005): 14–17.
14. Gusejnov, M. "Obosnovanie vybora kriteriev jeffektivnosti transportnyh sudov." *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Tehnicheskie nauki* 18.3 (2010): 89–95.
15. Maliy, P. A. "Principy opredelenija kachestva i tehnikeskogo urovnja gruzovyh transportnyh sudov." *Trudy LIVTa «Teorija, proektirovanie i tehnikeskaja jekspluatacija sudov rechnogo flota»* 127 (1970): 87–92.
16. Bezyukov, O., and I. Ivachin. "Method of forming the sheet of technical level and quality of marine diesels." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2009): 77–86.
17. Afanaseva, O. V. *Vibrodiagnostirovanie tehnikeskogo sostojanija sudovyh dizelej po kriterijam podobija*: PhD diss. (Tech.). SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2004.
18. Bezyukov, Oleg. "Kriterii tehnikeskogo urovnja osnovnyh jelementov sudovyh gazoturbinnih dvigatelej." *Materialy mezhdunarodnoj nauch.-tehn. konferencii «Vodnye puti Rossii: stroitel'stvo, jekspluatacija, upravlenie», 1-2 oktjabrja 2009. Kniga II*. SPb.: SPGUVK, 2010: 113–122.

19. Bezyukov, Oleg. "Kriterij dlja ocenki nauchno-tehnicheskogo urovnja sudovyh dizelej." *Tr. mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminara "Issledovanie, projektirovanie i jekspluatsija sudovyh DVS"*. SPb.: Park-Com, 2006: 16–19.
20. Maksimets, A. V. Izmerenie rashoda topliva sudovymi dizeljami ultrazvukovym metodom v uslovijah jekspluatsii: abstract of PhD diss. (Tech.). SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2004.
21. Orlov, A. E. Metodika opredelenija rashoda topliva i jeffektivnoj moshhnosti sudovogo DVS v uslovijah jekspluatsii: abstract of PhD diss. (Tech.). SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Афанасьева Ольга Владимировна —
кандидат технических наук, доцент.
Национальный минерально-сырьевой
университет «Горный»
OVAf@rambler.ru
Денисова Анастасия Александровна — соискатель.
Научный руководитель:
Безюков Олег Константинович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
an-denisova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
okb-nayka@yandex.ru
Afanasyeva Olga Vladimirovna —
PhD, associate professor.
National Mineral Resources University
(Mining University)
OVAf@rambler.ru
Denisova Anastasiya Aleksandrovna — applicant.
Supervisor:
Bezyukov Oleg Konstantinovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
an-denisova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2015 г.

УДК 621.431.074

**Г. Е. Живлюк,
А. П. Петров**

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДАЧИ COMMON RAIL

Современный поршневого двигателя внутреннего сгорания невозможно представить без систем подачи топлива с электронным управлением, изменения фаз газораспределения, наддува и т. д. Таким образом, под программное управление электроникой переданы важнейшие процессы, протекающие в ДВС на всех эксплуатационных режимах.

Настоящая статья сосредоточена на рассмотрении направлений создания и развития аккумуляторных систем топливоподачи высокого давления. Показано, что необходимый уровень давления и требуемые характеристики впрыска могут быть обеспечены современными системами с электронным управлением типа Common Rail. Внедрение подобных систем как одного из способов улучшения топливной экономичности и повышения экологической безопасности судовых дизельных установок вызвано жизненной необходимостью. Показаны достижения в части разработки и организации процесса топливоподачи высокого давления применительно к двигателям различной мощности судового и наземного назначения, выбора соответствующих материалов для агрегатов и элементов как направления повышения надежности и долговечности систем. Рассмотрены аспекты создания программного и аппаратного обеспечения процессов управления. Представлены технические характеристики топливной аппаратуры фирмы L'Orange, созданной для двигателей, выпускаемых в странах Азии. Приведено описание систем топливоподачи судовых двигателей фирм Bosch, Wartsila, Woodward, MAN-B & W, Mitsubishi Heavy Industries. Краткому анализу посвящены перспективы дальнейшего повышения давления впрыска топлива в цилиндры двигателя.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, система управления электронная, блок управления электронный, топливоподача, впрыск топлива, система топливоподачи аккумуляторная, насос высокого давления, форсунка, клапан гидравлический, рабочий процесс.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ и внедрение в конструкцию электронных систем управления процессами является самым динамично развивающимся направлением в мировом и отечественном двигателестроении. Современный поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС) невозможно представить без электронно-управляемых систем подачи топлива, изменения фаз газораспределения, наддува, сокращения выбросов вредных веществ с отработавшими газами в окружающую среду, утилизации и т. д. [1]. Таким образом, под программное управление электроникой переданы важнейшие процессы, протекающие в ДВС на всех эксплуатационных режимах.

Наиболее важным предметом регулирования, в основном определяющим все параметры двигателя, является система топливоподачи. Традиционно законы подачи топлива определялись конструкцией топливного насоса высокого давления (ТНВД), форсунки и профилем кулачка вала ТНВД. Однако такое управление впрыском имеет весьма ограниченные возможности. Использование быстродействующих электронно-управляемых гидравлически разгруженных клапанов в системе высокого давления топлива позволили, начиная с 1990-х гг. кардинально изменить ситуацию к лучшему. Несомненное лидерство в производстве электронно-управляемых систем топливоподачи принадлежит фирме *Bosch*, которая создала ТНВД распределительного типа VP 44 с электронным управлением впрыска и в 1996 г. запустила его в массовое производство [2]. ТНВД такого типа позволили развивать давление топлива до 90 МПа и обеспечивать высокую динамику согласования дозировки цикловой подачи топлива в каждом отдельном цикле, а также возможность независимого выбора момента начала подачи топлива от хода плунжера. Однако искажения законов подачи, неизбежно возникающие в топливных магистралях высокого давления, не позволили в полной мере реализовать возможности такого технического решения. Частично эти проблемы решались путем использования электронно-управляемых насос-форсунок, способных развивать более высокие значения давления впрыска (в перспективе до 205 МПа) с сохранением всех перечисленных преимуществ системы с электронно-управляемым насосом распределительного типа. Но создание импульса такого высокого давления было связано с нагрузками на кулачок и распределительный вал, которые провоцировали высокие износы механизма. При этом в обоих случаях на формирование закона давления подачи топлива накладывался отпечаток характера движения плунжера, определяемый профилем кулачка.

Разделить функции создания давления топлива и производства впрыска топлива в цилиндр позволяет аккумуляторная система с общей топливной магистралью высокого давления — система Common Rail (CR) (рис. 1).

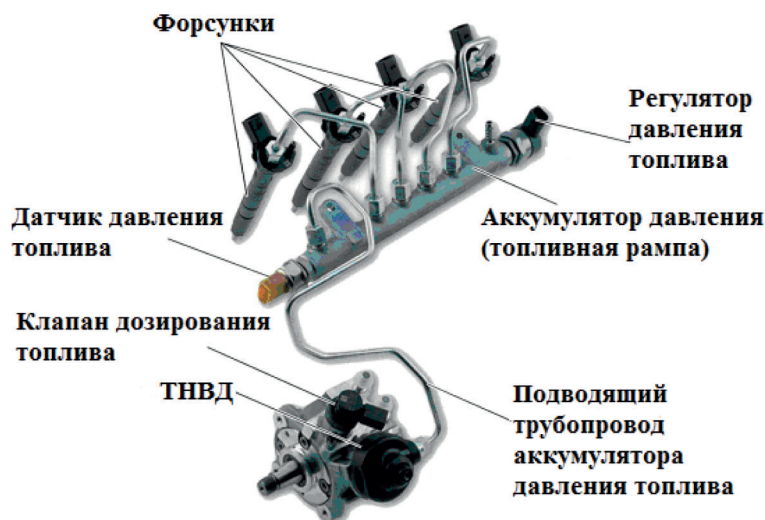


Рис. 1. Система Common Rail

В системе CR давление топлива в аккумуляторе (топливной рампе) создается вне зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя и количества впрыскиваемого топлива и может быть задано во всем рабочем диапазоне в соответствии с требованиями управления рабочим процессом. Давление в системе постоянно создается ТНВД, освобожденном от распределительной функции и работающим при низких значениях крутящего момента на приводном валу. Регулировка значений давления производится отдельным импульсным клапаном регулировки давления, находящимся под контролем электронного блока управления. В системах первого поколения давление в рампе не превышало 135 МПа, а усовершенствованная система впрыска второго поколения, принятая к массовому производству с 2001 г. развивала давление до 160 МПа [3].

Первично система CR была разработана и серийно применена для высокооборотных двигателей автотранспортного назначения малой размерности с цилиндровой мощностью от 10 до 50 кВт при 1800 – 2700 об/мин. Малые цикловые подачи топлива (порядка 0,1 г/цикл) в дизельных ДВС такого типа не выдвигают особых требований к объему аккумулятора системы, поскольку не способны вызвать ощутимых пульсаций давления топлива в рампе. Вместе с тем, относительно малый объем аккумулятора позволяет изготавливать его из доступных и недорогих материалов. Проверка и упрочнение топливной рампы производились под действием взрыва с созданием предельного давления в объеме аккумулятора до 360 МПа [4], [5].

Закон подачи топлива в аккумуляторной системе CR формируется как за счет создаваемого давления в рампе, так и за счет суммарной длительности многократного открытия форсунки, которая, в свою очередь, инициируется посредством многократной активации быстродействующего электронно-управляемого гидравлического клапана форсунки (рис. 2).

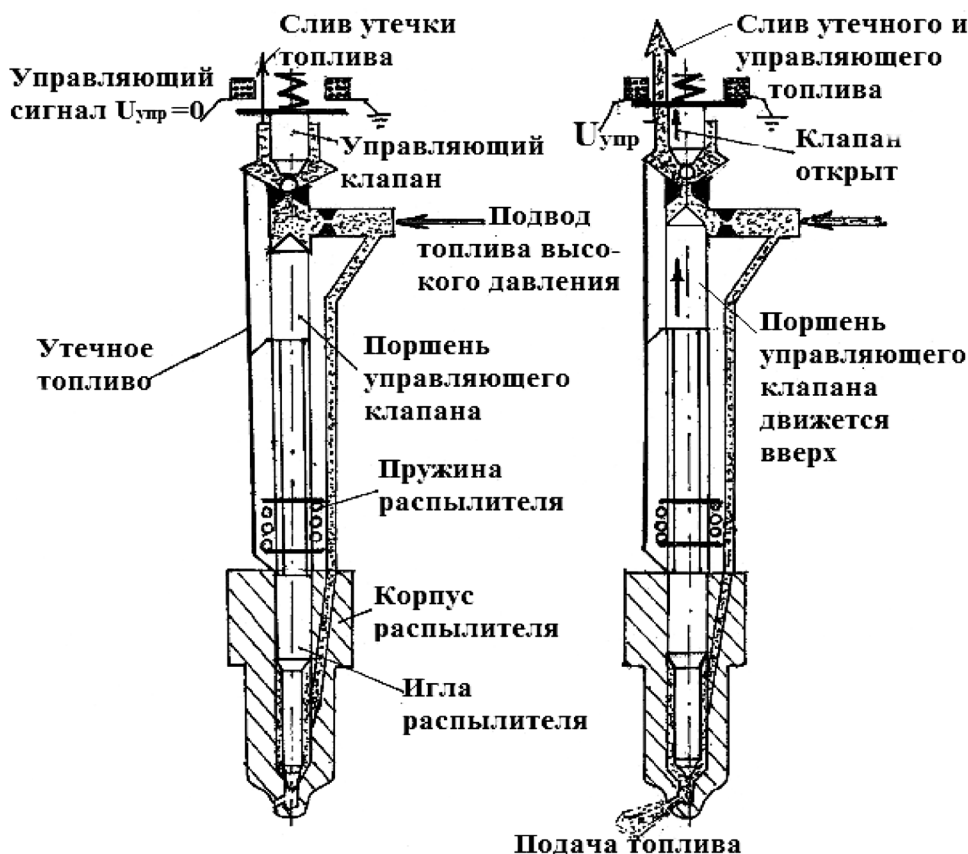


Рис. 2. Принцип действия и конструкция форсунки системы CR

Это выгодно отличает Common Rail от существующих традиционных схем топливоподачи. Вместе с тем, система CR весьма удачно вписывается в традиционную конструкцию двигателя и общую структуру электронного управления, а постоянное развитие и совершенствова-

ние свойств материалов, технологий, микропроцессорной техники и программного обеспечения позволяет все шире раскрывать ее потенциал. Такие существенные преимущества электронно-управляемой аккумуляторной системы CR предопределяют её рассмотрение как наиболее перспективной системы топливоподачи.

Дальнейшее развитие системы CR происходит одновременно в нескольких направлениях. Наибольшее внимание разработчиков уделяется совершенствованию конструкции системы. При этом такие направления, как:

- теоретические разработки в области управления рабочими процессами двигателя с системой CR;
- создание программного и аппаратного обеспечения;
- использование новых износостойких материалов в конструкции,

также являются важными для достижения высоких эксплуатационных характеристик двигателей, оснащенных аккумуляторной электронно-управляемой системой CR. Несмотря на то, что все эти направления тесно взаимосвязаны друг с другом, отдельное их рассмотрение позволяет выявить важнейшие пути совершенствования системы. Примерами реализации служат разработки упомянутой фирмы *Bosch*, фирм *Caterpillar Motoren GmbH* [6], *HEINZMANN* [7], *Duap AG* [8], *DENSO* [9], [10] и др.

При создании системы CR для судовых средне- и малооборотных дизелей с цилиндровой мощностью до 300 кВт при 720 – 1200 об/мин и цикловой подачей более 4 г/цикл обращалось внимание на флуктуации давления топлива в рампе, которые оказывают негативное влияние на параметры впрыска [11], [12]. При этом существенное увеличение объема аккумулятора для сглаживания пульсаций давления влечет за собой адекватный рост нагрузок на стенки аккумулятора, провоцирующих его разрушение. Этот факт потребовал для большеразмерных стационарных и судовых ДВС пересмотреть концепцию системы и ввести в конструкцию дополнительные индивидуальные аккумуляторы для каждой форсунки (группы форсунок) [13]. Примером такой форсунки — сердца новой системы впрыска Common Rail — является её разработка фирмой *L'Orange* в тесном сотрудничестве с *MTU* [14], [15] для двигателей серии 1163. Последние были разработаны в начале 1980-х гг., и сегодня представлены на рынке в третьем поколении. В первую очередь он был разработан для военно-морского использования. Но с развитием паромного бизнеса в середине 1990-х гг. конструкция двигателя в 1994 г. была улучшена, чтобы справиться с чрезвычайно высокой нагрузкой высокоскоростных паромов, и сегодня отличается малой удельной массой. В четвертом поколении, с начала серийного производства в августе 2013 г., двигатель отвечает требованиям законодательства по нормам выбросов вредных веществ с отработавшими газами IMO II. Это позволило компании в полной мере использовать потенциал системы впрыска топлива в сочетании с другими ключевыми технологиями для переработки процесс горения.

Наряду с давлением впрыска, которое влияет на расход топлива и выбросы, важным является закон впрыска [16], [17]. Закон впрыска определяет, когда и сколько топлива впрыскивается в цилиндр. Для того чтобы уменьшить выбросы и расход топлива на данном этапе эволюции системы впрыска для двигателей MTU, предлагается делить последовательность впрыска топлива на три отдельные фазы (рис. 3) [18], [19]. Основная фаза впрыска топлива определяет мощность двигателя. Предварительная фаза впрыска инициирует раннее сгорание, чтобы обеспечить контролируемое горение топлива в основной фазе впрыска.

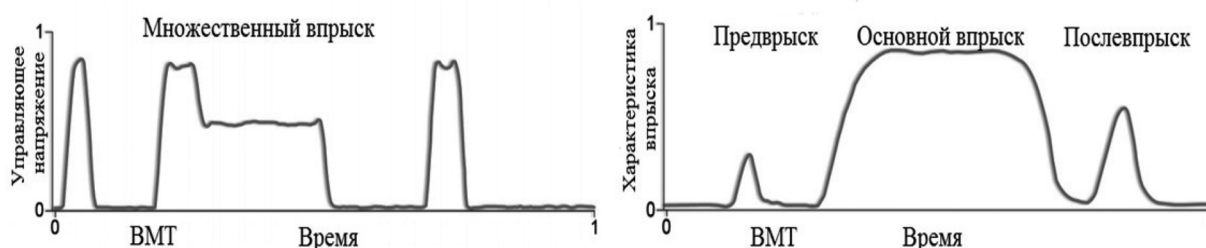


Рис. 3. Расход топлива и дробление впрыска

Это уменьшает выбросы оксидов азота, так как более плавное протекание процесса тепло-выделения, происходящее в этом случае, предотвращает достижение высоких температур в цикле дизельного двигателя. Фаза послевпрыска, следующая непосредственно после основной фазы впрыска топлива, снижает выбросы твердых частиц за счет более полного перемешивания топлива и воздуха во время поздней фазы сгорания (фазы догорания). Одновременные турбулизация заряда и повышение температуры фазы догорания способствуют окислению сажи. Таким образом, в зависимости от режима работы двигателя, основная фаза впрыска топлива может быть дополнена фазами предвпрыска и (или) послевпрыска — в зависимости от требуемых условий организации внутрицилиндровых процессов. Подобные работы по совершенствованию конструкции с целью повышения эксплуатационных характеристик были выполнены для двигателя MTU 4000.

Для достижения намеченных целей одной из основных мер было изменение системы впрыска топлива. До сих пор двигатель был оснащен обычной системой Насос-Трубопровод-Форсунка (Pump Line Nozzle – PLN), ограниченной в своей функциональности. Она была заменена системой впрыска Common Rail с современной форсункой *L'Orange*. Преимуществами системы Common Rail перед системой PLN являются: а) давление впрыска постоянно доступно почти во всем диапазоне скоростей; б) свободный выбор закона впрыска. Это означает, что возможен выбор идеального момента впрыска и количества впрыскиваемого топлива во всем поле рабочих режимов двигателя. Сравнение двух систем топливоподачи приведено на рис. 4.

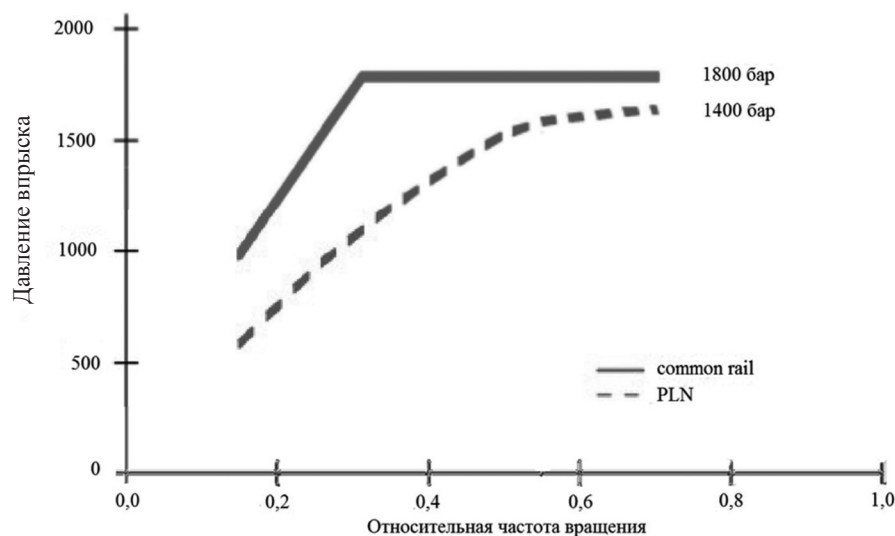


Рис. 4. Сравнение возможностей систем топливоподачи PLN – Common Rail

Половина времени из трех лет с начала реализации проекта до начала производства в процессе совершенствования двигателей новой серии MTU 4000 была уделена созданию новой форсунки LEAD2. Акцент был сделан на использование стандартных деталей и конструктивных особенностей. Базой явилась форсунка серии MTU 4000, которая производится в больших количествах, уже используется в третьем поколении двигателей и постоянно совершенствуется для достижения целевых показателей выбросов и повышения стойкости к износу (рис. 5).

Для достижения требуемого мгновенного роста впрыска (примерно в четыре раза выше, чем для серии MTU 4000) потребовалось совершенствование геометрии каналов форсунки (рис. 6).

Применение форсунок со встроенным топливным резервуаром предотвращает колебания давления в рампе системы и, следовательно, мгновенные дефицит или избыток подачи топлива к форсункам.

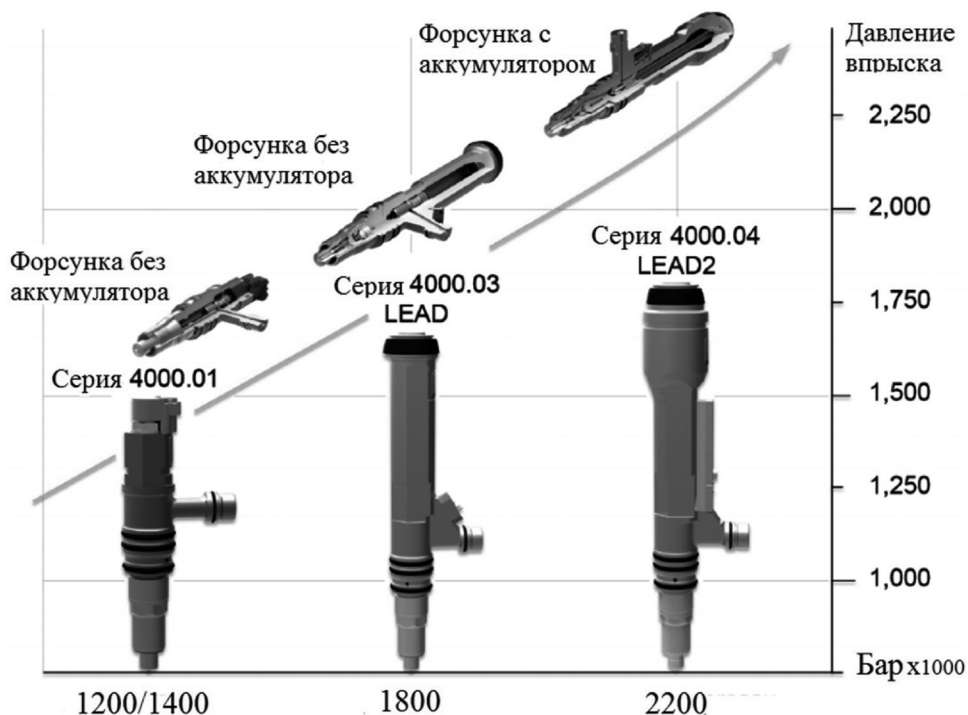


Рис. 5. Изменение давления впрыска двигателей серии 4000 с 1996 г. по настоящее время

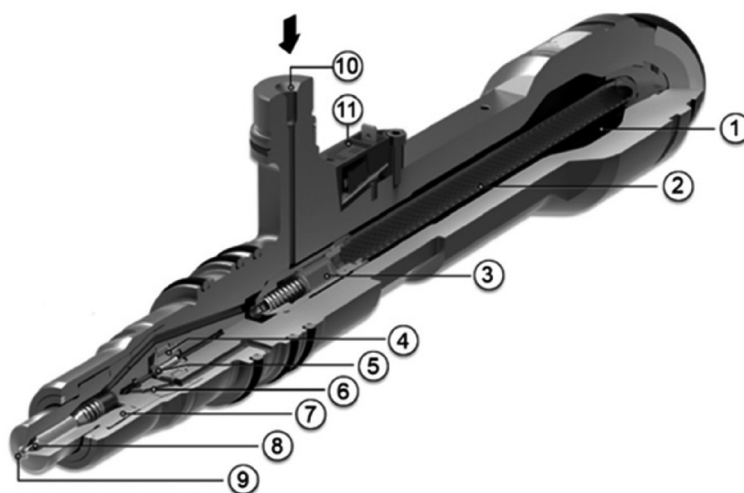


Рис. 6. Форсунка LEAD2 L'Orange со встроенным топливным аккумулятором давления:

- 1 — аккумулятор; 2 — фильтр; 3 — ограничительный клапан;
4 — электромагнит актюатора; 5 — управляющий клапан; 6 — каналы управления;
7 — элемент распылителя, изготовленный из стали с высокой термостойкостью; 8 — игла распылителя;
9 — распылитель; 10 — подвод топлива высокого давления; 11 — электрический разъем

Одной из целей являлась возможность множественного (многофазного) впрыска. Аккумулятор в форсунке позволяет снизить пульсации давления по сравнению с обычным, общим для всех форсунок аккумулятором. Это приводит к возможности увеличения давления в системе, повторяемости и стабильности давления и количества впрыска для реализации распределенного впрыска. Аккумулятор, как и все топливные каналы и трубопроводы, был разработан для максимального количества впрыска в 3100 мм^3 и гидравлического расхода сопла в 15 л/мин. Хотя двигатель пока работает с давлением в системе 1600 бар, аккумулятор и форсунка были разработаны для давле-

ния 1800 бар. Кроме того, наряду с внедрением в корпус форсунки LEAD2 аккумулятора давления форсунка снабжена модифицированным блоком управления. Блок управления не только обеспечивает производительность обновленных форсунок, но также вносит значительный вклад в стабильность параметров форсунки в течение 6000 часов работы.

Похожие технические решения при разработке форсунки со встроенным аккумулятором для системы топливоподачи моторного топлива были приняты итальянской фирмой OMT [20], [21]. Об этом свидетельствует вид представленной разработчиками форсунки (рис. 7).

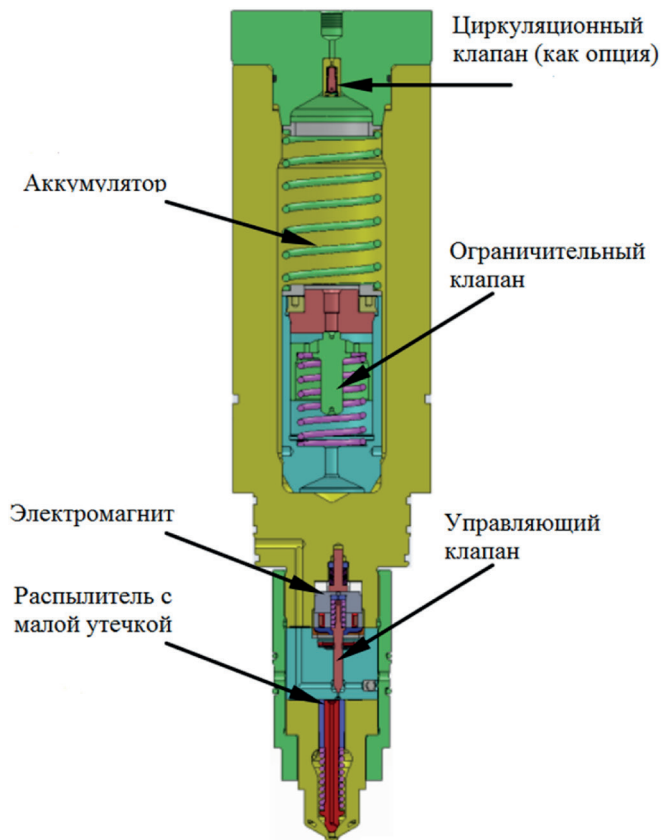


Рис. 7. Форсунка OMT со встроенным топливным аккумулятором давления

Форсунка содержит встроенный аккумулятор, а также ограничительный клапан для защиты двигателя в случае отказа форсунки. Обеспечивается множественный впрыск топлива для обеспечения максимальной гибкости в формировании кривой тепловыделения. Это достигнуто путем разработки блока управления, способного работать при высокой температуре мазута и помещенного очень близко к игле форсунки для минимизации времени её срабатывания и времени выдержки между впрысками. Этой концепции отвечает и конструкция электромагнита, способного удовлетворить высокие требования к времени переключения, работоспособности (сила при перемещении клапана) при ограниченных размерах и высоких рабочих температурах.

В целях обеспечения унификации, для комплектования системой Common Rail целого модельного ряда дизелей, объединяющих в конструкции 6, 8, 12, 16 и более цилиндров, предлагается построение системы CR по модульному принципу [22]. Такое конструкторское решение позволяет повысить стабильность параметров и облегчает конструирование системы. Решение оказалось столь удачным, что практически все основные производители судовых двигателей в своих конструкциях используют модульные системы CR. Так, например, известны работы по созданию модульной электронно-управляемой аккумуляторной системы впрыска семейства двигателей фирмы MAN-B & W размерности 32/44 с цилиндровой мощностью 560 кВт [23], [24] и числом цилинд-

ров от 6 до 10 — рядной конструкции и от 12 до 20 — для V-образной. Так же известны работы фирм *Sulzer* (двигатели типа RT-flex) [25], [26], *Mitsubishi Heavy Industries* (двигатель MARK-30B) [27], [28] и др. С модульным принципом построения систем CR на рынок судовых ДВС вышла и фирма *Bosch*. С использованием значительного накопленного опыта создания, производства и эксплуатации систем для большегрузной автотранспортной техники была создана и сертифицирована конструкция системы MCRS-22-HFO для двигателей с цилиндровой мощностью от 100 до 350 кВт и числом цилиндров от 4 до 20 [29], [30]. Разработчик систем CR для судовых двигателей, выпускаемых странами тихоокеанского региона, фирма *L'Orange GmbH* также в своих поисках оптимальной конфигурации системы пришла к модульному принципу ее построения [31]. Совместно с двигателестроительной фирмой *Jinan Diesel Engine Co., Ltd.* фирмой разработаны две новых модели двигателей с системой Common Rail – JDEW 175 CR и JDEW 260 CR.

Особые трудности в организации работы системы CR вызывает работа на тяжелых видах топлива. Для реализации такой возможности фирмой *Woodward*, специально для среднеоборотных двигателей *Wartsila 16V46D-CR*, была разработана модульная система LCR (большая Common Rail) с возможностью обслуживания до 18 цилиндров (рис. 8) [32]. Конструкция LCR предусматривает возможность циркуляции топлива в трубопроводах после остановки двигателя, а топливные форсунки используют в электрогидравлической системе не топливо, а сервомасло.

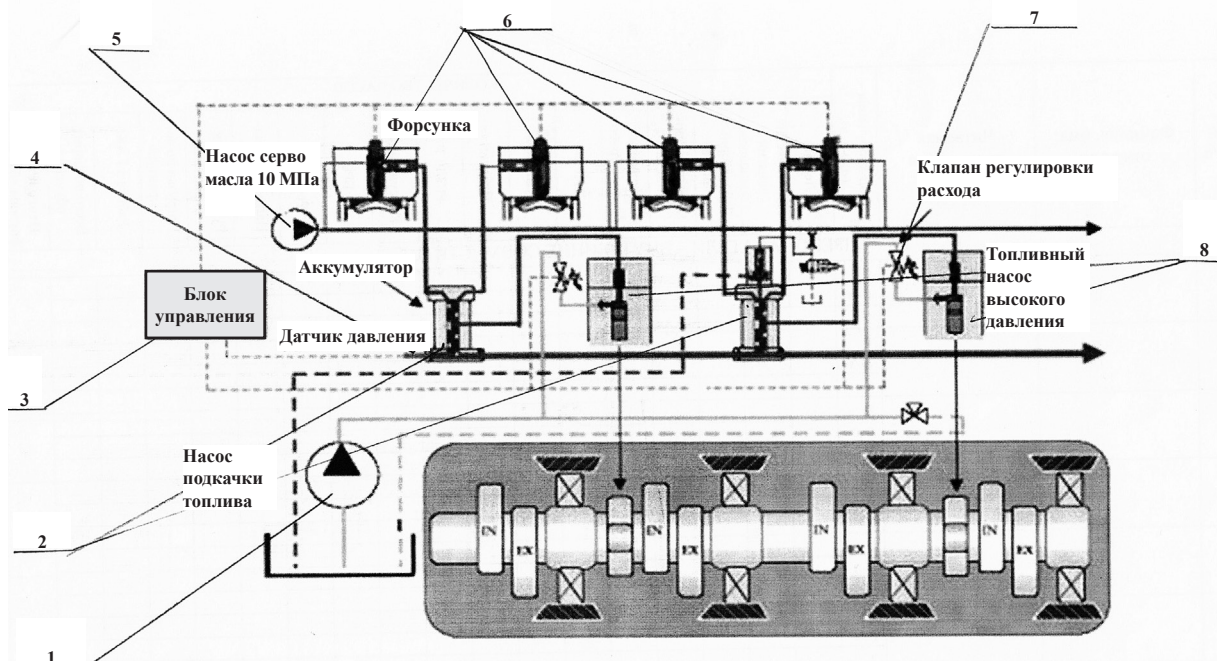


Рис. 8. Устройство системы LCR Woodward – Wartsila

- 1 — топливopодкачивающий насос; 2 — аккумулятор давления топлива; 3 — блок управления;
4 — датчик давления топлива; 5 — насос сервомасла 10 МПа; 6 — форсунка;
7 — клапан регулировки расхода топлива; 8 — топливный насос высокого давления

Привод топливного насоса высокого давления системы осуществляется от индивидуальных кулачков, размещенных на распределительном вале газораспределительного механизма. На начальном радиусе кулачков привода каждого ТНВД скомпонованы по два кулачка, что позволяет увеличить производительность насоса высокого давления и, благодаря специальному профилю, максимально снизить нагрузки на распределительный вал механизма газораспределения. Аккумуляторы LCR питают форсунки двух соседних цилиндров и соединены общей топливной рампой. Форсунки с электромагнитным управлением обеспечивают закон подачи, угол опережения и объем топлива, соответствующие режиму работы двигателя (по частоте вращения коленчатого вала и крутящему моменту). Таким образом, достигается оптимизация процесса сгорания с целью

получения максимальной топливной экономичности при одновременной минимизации вредных выбросов с отработавшими газами. Похожие конструкции модульных систем получают развитие и у других производителей.

Очевидно, что высокие механические и термические нагрузки, возникающие в деталях системы CR, сокращают ресурсные показатели и предъявляют повышенные требования к материалам, используемым в конструкции. Самыми уязвимыми узлами в этом отношении являются распылители форсунок (износ запорного конуса и направляющей поверхности иглы, размывание отверстий распылителя) и узел быстродействующего управляющего клапана форсунки [12]. Повышение длительной работоспособности элементов конструкции системы Common Rail с одновременным снижением себестоимости изделий может быть достигнуто различными методами. Наряду с методами, предусматривающими усовершенствование конструкции, в качестве наиболее перспективного направления рассматривается использование в конструкции новых, нетрадиционных для отрасли материалов, способных значительно повысить работоспособность деталей. Проблема абразивной эрозии клапана форсунки эффективно решается с использованием более твердых деталей из безоксидной керамики. Известны работы по изготовлению клапана с использованием нитрида кремния и седла из карбида вольфрама для седел клапанов также используется карбид титана [33] – [35]. Использование керамических конструкционных материалов обеспечивает увеличение ресурса работы узла практически на порядок. Для повышения жаропрочности тяжело нагруженных узлов, возможно применение теплоизоляционных покрытий из оксидной и безоксидной керамики (например, частично стабилизированного диоксида циркония).

Интересным представляется направление работ по использованию вместо электромагнитных управляющих клапанов форсунок CR клапанов, использующих в своей основе эффекта пьезокристалла [36] – [39]. Использование в конструкции форсунки пьезоэлемента (рис. 9) позволяет значительно увеличить её быстродействие и, следовательно, обеспечивает широкие возможности по управлению законом впрыска топлива. Кроме того, такое решение упрощает конструкцию и снижают себестоимость изделия.

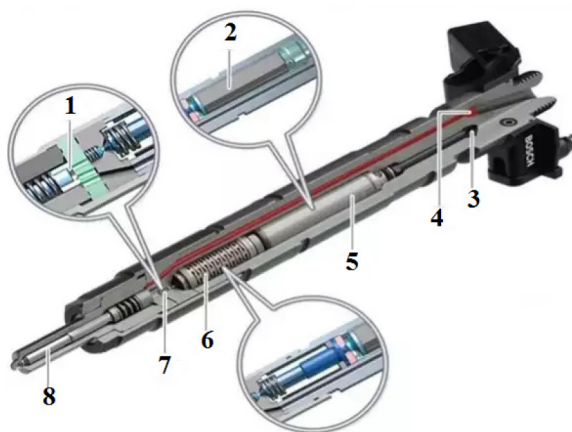


Рис. 9. Конструкция пьезоэлектрической форсунки:

- 1 — управляющая камера; 2 — пьезоэлемент; 3 — канал возврата топлива утечки и управляющего топлива;
4 — канал подвода топлива высокого давления; 5 — силовой модуль; 6 — управляющий модуль;
7 — переключающий клапан; 8 — игла распылителя

Можно предположить, что дальнейшие усилия по улучшению параметров стабильности и долговечности конструкции откроют перспективы для более массового использования пьезоэлектрических форсунок.

Создание эффективно работающих систем CR и выполнение постоянно ужесточающихся требований ИМО, TIER и др. становится невозможным без глубоких теоретических проработок физических явлений, связанных с организацией высокоэкономичного и экологически безопасного рабочего процесса дизельного ДВС. Программное обеспечение электронного блока управления дви-

гателем предусматривает использование полуэмпирических математических моделей, на основании которых формируется функция управления процессами. Исходя из этого, в качестве одного из перспективных направлений развития систем CR следует рассматривать совершенствование моделей управления впрыском и сгоранием топлива и, связанной с этим, разработки программного обеспечения управления процессами. Примером постоянного совершенствования процессов управления может служить тот факт, что первые промышленные образцы системы CR первого поколения имели весьма скромные возможности электронной адаптации структурных элементов при их замене, что вызывало массу проблем в эксплуатации и ремонте. Так, например, при замене форсунки, для учета технологических неточностей изготовления, требовалось ее прописывание в память электронного блока управления дилерским сканером. Этот существенный недостаток первого поколения системы в дальнейшем был устранен, и в программном обеспечении CR следующих поколений функция адаптации заменяемых структурных элементов системы была расширена [4].

Исследования процесса управления впрыском топлива в цилиндр и, связанного с ним, закона тепловыделения в цикле являются основополагающими в построении алгоритмов управления системой. В этом плане интересны работы, проведенные *Mitsubishi Heavy Industries* [27], [28], по формированию концепции «башмачного» впрыска (название принято из подобия внешнего вида характеристики подачи соответствующей обуви). Как отмечают авторы, обычная система Common Rail обеспечивает закон впрыска, близкий к прямоугольному, что приводит к большим скоростям тепловыделения на стадии кинетического сгорания и, как следствие, к росту эмиссии NO_x . Различия между обычным и «башмачным» впрыском заключается в оптимизации длительности последнего в целях обеспечения «мягкого» сгорания, т. е. медленного повышения давления и температуры в цикле с сохранением общей динамики тепловыделения. Для этого предложенная система предусматривает раздельное задание уровней высокого и низкого давления топлива (180 и 60 МПа соответственно). Таким образом, первая фаза топливоподачи производится при низком уровне давления топлива (запальная порция), а вторая — основная — при высоком давлении. В результате при «башмачном» впрыске сокращается скорость нарастания и уровень температуры в цикле, что обеспечивает снижение эмиссии NO_x примерно на 20 % без потери экономичности двигателя. Важное значение для достижения высоких требований стандарта Tier 3 (с 2016 г.) и, в перспективе, Tier 4 имеет дальнейшее увеличение давлений топливоподачи, развиваемые в аккумуляторах системы CR.

Каковы пределы повышения давления впрыска и существуют ли они?

Повышение давления подачи топлива способно увеличить дисперсность распыливания топлива, угол раскрытия топливного факела и, в результате, позволяет более полно использовать свежий заряд цилиндра в процессе сгорания. Эти явления способствуют сокращению эмиссии несгоревших углеводородов, сажи и оксидов азота с отработавшими газами современных дизельных двигателей. Поэтому основные производители систем CR выявляют тенденцию к постоянному росту давления в системе (рис. 10), согласно [40], [41].

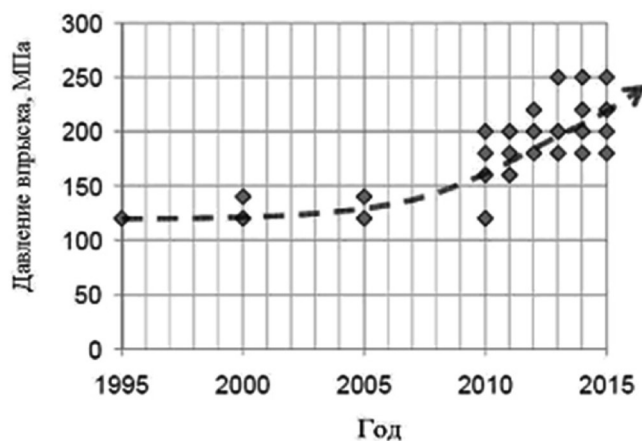


Рис. 10. Изменение давления впрыска в системах Common Rail

Очевидно, что с ростом давления впрыска растет дальнобойность факела, а тонкость распыла топлива повышается, но до определенного предела «насыщения», когда рост давления впрыска уже не оказывает прежнего влияния на дисперсность распыливания. Авторами в качестве определяющего параметра принята дальнобойность факела. Методика исследования, позволяющая оценить влияние повышения давления впрыска, основывается на оценке дальнобойности факела в результате превышения давления впрыска над давлением в камере сгорания. Тогда при одинаковом коэффициенте избытка воздуха дальнобойность факела может быть увеличена как за счет повышения давления впрыска, так и за счет снижения давления газов в цилиндре.

Второй путь означает сокращение длительности впрыска. Целью авторов работы было оценить минимальный уровень высокого давления впрыска, при котором снижение давления в цилиндре для сохранения дальнобойности факела не требуется. Для этого вводится понятие «приведенного давления впрыска». При этом авторы [40] на основании проведенного комплекса экспериментально-теоретических исследований приводят данные по сокращению дымности работы двигателя с ростом давления впрыска при различных давлениях в цилиндре в конце сжатия (рис. 11).

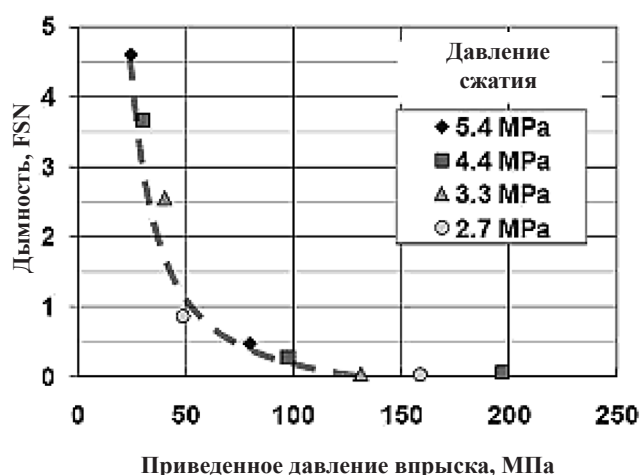


Рис. 11. Соотношение между «приведенным давлением впрыска» и сажеобразованием

В заключение необходимо отметить, что изложенные тенденции совершенствования систем CR:

- развитие конструкции с использованием модульного принципа;
- внедрение в конструкцию современных, в том числе, керамических конструкционных материалов;

- совершенствование программного обеспечения и проведение теоретических исследований процессов управления параметрами рабочего процесса,

являясь определяющими направлениями, далеко не исчерпывают полный перечень перспективных путей совершенствования CR, подробное рассмотрение которых выходит за рамки данной работы и могут являться предметом отдельного рассмотрения.

Выводы

Среди всего многообразия конструкций топливopодающих систем дизельных двигателей, аккумуляторная электронно-управляемая, самонастраиваемая система CR может рассматриваться как наиболее перспективная, способная обеспечить как высокую топливную экономичность, так и жесткие требования экологических стандартов.

Принимая во внимание специфику устройства и программы выпуска дизельных двигателей судового назначения, развитие конструкций систем CR для упомянутого и схожих типов двигателей происходит на основе модульного принципа построения с созданием индивидуальных топливоаккумулирующих объемов для каждого цилиндра (группы цилиндров), при этом аккумулятор давления может быть интегрирован в конструкцию самой топливopодающей форсунки.

В целях обеспечения требуемых ресурсных показателей при одновременном снижении себестоимости самых уязвимых в этом отношении узлов и системы СР в целом, широкое распространение получают конструкции с использованием керамических конструкционных материалов.

Важным этапом на пути дальнейшего совершенствования аккумуляторных систем топливоподачи является проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований процессов впрыска (в том числе, под сверхвысоким давлением — свыше 250 МПа) топлива и тепловыделения в камере сгорания дизельного двигателя, направленных на построение точных моделей управления внутрицилиндровыми процессами, способных обеспечить достижение требований стандартов Tier 3 и, в перспективе — Tier 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А. П. Развитие электронных систем управления судовыми двигателями внутреннего сгорания / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 152–169.
2. Казедорф Ю. Системы впрыска дизельных двигателей: пер. с нем. ООО «СтарСПб» / Ю. Казедорф, Э. Войцетшлегер. — М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2012. — 320 с.
3. Гюнтер Г. Диагностика дизельных двигателей. Серия «Автомеханик»: пер. с нем. Ю. Г. Грудского / Г. Гюнтер. — М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. — 176 с.
4. Системы управления дизельными двигателями / пер. с нем. С40. Первое русское издание. — М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. — 480 с.
5. Мельник Г. В. Обзор докладов по системам «Common Rail» на конгрессе CIMAC-2004, Киото / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2006. — № 2. — С. 44–52.
6. Caterpillar Common Rail. Catalog. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://pdf.nauticexpo.com/pdf/caterpillar-marine-power-systems/caterpillar-common-rail/19997-40609.html> (дата обращения: 29.10.2015).
7. Haas S. Introduction of the Caterpillar Common Rail on M32 engine family — Operational experience / S. Haas // Ship&Offshore / Schiff&Hafen. — 2010. — N. 3. — Pp. 37–38.
8. Heller M. The new HEINZMANN Common-Rail and EFI Engine Control System for medium-speed and high-speed engines / M. Heller, A. Jaufmann // Ship & Offshore. — 2010. — N 3. — Pp. 88–89.
9. Vogt E. Economical and technical aspects of DUAP's fuel Injection parts and systems. [Электронный ресурс] / E. Vogt, S. Jung, M. Poletti. — Режим доступа: http://www.duap.ch/wp-content/uploads/2013/07/paper131_cimac_2010.pdf (дата обращения: 22.01.2015).
10. Matsumoto S. Concepts and Evolution of Injector for Common Rail System / S. Matsumoto, K. Yamada, K. Date. — SAE Technical Paper, 2012. — № 2012-01-1753. DOI: 10.4271/2012-01-1753.
11. Matsumoto S. 4th Generation Diesel Common Rail System: Realizing Ideal Structure Function for Diesel Engine / S. Matsumoto, C. Klose, J. Schneider, N. Nakane, D. Ueda, S. Kondo. — SAE Technical Paper, 2013. — № 2013-01-1590. DOI: 10.4271/2013-01-1590.
12. Jay D. Common rail experiences & new developments — 4-stroke Wärtsilä engines / D. Jay, A. Järvi, K. Ehrstrom // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 1040–1056.
13. Jay D. C. Latest fuel injection systems on medium speed engines used for IMO tier 3 requirements in 2016 / D. C. Jay, D. Delneri, F. Cavressi // Fuel Systems for IC Engines. — 2012. — Pp. 89–102. DOI:10.1533/9780857096043.4.89.
14. Иванов М. Ю. Современные средне- и высокооборотные дизели с электронными системами управления / М. Ю. Иванов, В. А. Шишкин, А. П. Петров // Двигателестроение. — 2006. — № 4. — С. 40–45.
15. Senghaas C. New Heavy Fuel Oil Injection System / C. Senghaas, H. Schneider, S. Reinhard, D. Jay, K. Ehrstroem // MTZ worldwide eMagazine. — January 2011 — Volume 72 — Issue 1 — pp. 10–15.
16. Senghaas C. New platform based Common Rail Injector for MTU series 1163. [Электронный ресурс] / C. Senghaas, M. Ligensa, K. Reischmann. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 15.09.2013).
17. Rabe R. Fuel injection strategies for heavy fuel medium speed engines to comply with future emission limits / R. Rabe, M. Epp, C. Fink, H. Harndorf, E. Hassel // Ship & Offshore. — 2010. — № 3. — Pp. 66.

18. *Fink C.* Hydraulic measures to improve common-rail injection system performance — Impact of injection rate shaping on emissions of a medium speed diesel engine. [Электронный ресурс] / C. Fink, M. Dresche, J. R. Rabe, H. Harndorf. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 23.02.2015).

19. *Kech J.* Common Rail Fuel Injection: Key technology for clean and economical combustion. [Электронный ресурс] / J. Kech, M. Willmann, P. Gorse, M. Boog. — Режим доступа: http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/white-papers/3100651_MTU_General_WhitePaper_CommonRail_2011.pdf (дата обращения: 22.11.2014).

20. *Heim K.* Advanced Common Rail Injection for Medium Speed Engines / K. Heim, M. Coppo // MTZ industrial. — 2013. — Vol. 3. — Is. 2. — Pp. 28–35.

21. *Coppo M.* Advanced HFO Common Rail Injector for Maximising the Performance of Medium Speed Engines. [Электронный ресурс] / M. Coppo, C. Negri, K. Heim, A. Banno. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 02.12.2013).

22. *Brunner H.* Common Rail Wäertsilä 2-Stroke Engines in Practice / H. Brunner, M. Betschart, S. Fankhauser // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 995–1009.

23. *Vogel C.* The new MAN 32/44 CR — efficient, clean and compact / C. Vogel, G. Heider, S. Haas, A. Marzinek // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 36–46.

24. New HFO Common Rail System for Medium speed Diesel Engines. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://docslide.us/documents/man-common-rail-cimac1.html> (дата обращения: 19.02.2014).

25. *Шишкин В. А.* Развитие двухтактных малооборотных ДВС с электронным управлением / В. А. Шишкин, А. П. Петров, М. Ю. Иванов // Двигателестроение. — 2006 — № 2. — С. 26–31.

26. *Heim K.* Latest developments of Wäertsilä low-speed engines to meet current and future customer demands / K. Heim // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 10–23.

27. *Sugihara M.* Creating a Whole Range of Benefits with the MITSUBISHI UEC Eco-Engine / M. Sugihara, K. Edo, T. Tanida // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 1009–1019.

28. *Hiraoka N.* Exhaust Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine / N. Hiraoka, K. Imanaka. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 22.08.2013).

29. *Kendlbacher C.* The 2200 bar Modular Common Rail Injection System for Large Diesel and HFO Engines. [Электронный ресурс] / C. Kendlbacher D. Blatterer, M. Bernhaupt. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 20.02.2015).

30. *Rehbichler G.* The Bosch Electronic Diesel Control System for Medium and High Speed Engines. [Электронный ресурс] / G. Rehbichler, C. Kendlbacher, M. Bernhaupt. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 22.05.2014).

31. *Heller M.-T.* L'Orange Fuel Injection Systems in China & Asia -Past Experience, Today's Expertise and Examples for Tomorrow's Excellence. [Электронный ресурс] / M.-T. Heller, T. Stelzer, M. Riegert, S. Li. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 22.11.2015).

32. Result Type 51223 — Energy Control Technologies on the Queen Mary 2. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.woodward.com/searchpublications.aspx> (дата обращения: 20.07.2014).

33. *Батаев А. А.* Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев, В. А. Батаев. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. — 383 с.

34. *Батаев А. А.* Композиционные материалы / А. А. Батаев, В. А. Батаев. — М.: Логос, Университетская книга. Серия Новая университетская библиотека, 2006. — 400 с.

35. Машиностроение: Энциклопедия: в 40 т. Технология производства изделий из композиционных материалов, пластмасс, стекла и керамики. — Т. 3 – Т. 6. — М.: Машиностроение, 2006.

36. Дизельные аккумуляторные топливные системы COMMON RAIL (Bosch). — М.: Легион-Автодата, 2010. — 94 с.

37. *Oki M.* 180MPa Piezo Common Rail System / M. Oki, S. Matsumoto, Y. Toyoshima, K. Ishisaka. — SAE Technical Paper. — № 2006-01-0274. DOI: 10.4271/2006-01-0274.

38. Oh B. Development of an Injector Driver for Piezo Actuated Common Rail Injectors / S. Oh, K. Lee, M. Sunwoo. — SAE Technical Paper. — № 2007-01-3537. DOI: 10.4271/2007-01-3537.
39. Lazarev V. A Method for the Estimation of the Service Life of a Precision Guiding Interface “Needle - Nozzle Body” of a Common-Rail-Injector for High Rail Pressures / V. Lazarev, J. Wloka, G. Wachtmeister. — SAE Technical Paper. — № 2011-01-2020. DOI:10.4271/2011-01-2020.
40. Minamino R. Fuel injection concept for the future clean diesel engines / R. Minamino, T. Kawabe, H. Omote, S. Okada // Schiff & Hafen / Ship & Offshore. — 2013. — Special. — Pp. 8–9.
41. Развитие систем топливоподачи дизельных двигателей (материалы конгресса СИМАС 2013) // Двигателестроение. — 2014. — № 4. — С. 46–57.

STATUS AND PROSPECTS OF PERFECTION OF FUEL SUPPLY SYSTEM COMMON RAIL

Modern piston internal combustion engine can not be imagined without fuel systems with electronic control, variable valve timing, turbocharging, etc. Thus, under software control electronically transferred most important processes in the internal combustion engine at all operating conditions.

This article focuses on reviewing the establishment and development of battery systems, high-pressure fuel. It is shown that the required pressure and the required level of fuel injection characteristics can be provided by modern systems c electronically controlled type Common Rail. The introduction of these systems as a way to improve fuel economy and increase of ecological safety of diesel plants, caused a necessity. Showing progress in terms of development and organization of the high-pressure fuel for engines of various capacities, selection of appropriate materials for the components and elements as the direction of increasing the reliability and durability of the systems. Aspects of the creation of hardware and software management processes. Specifications of the fuel equipment company «L'Orange», created for the engines produced in Asia. The description of the fuel system of marine engines companies Bosch, Wartsila, Woodward, MAN B & W, Mitsubishi Heavy Industries. Devoted to a brief analysis of the prospects for further increasing the pressure of fuel injection into the cylinders of the engine.

Keywords: internal combustion engine, electronic control system, electronic control unit, fuel supply, fuel injection, fuel accumulator system, high-pressure pump, injector, hydraulic valve, workflow.

REFERENCES

1. Petrov, A. P., and G. E Zhivlyuk. “Development of electronic control systems of internal combustion engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 152–169.
2. Kazedorf, U., and E. Voyzetzshleger. *Sistemy vpryska dizelnyh dvigatelej*. M.: ZAO “KZHI” Za rulem”, 2012.
3. Gunther, G. *Diagnostika dizelnyh dvigatelej. Serija «Avtomehanik»*. M.: ZAO “KZHI” Za rulem”, 2004.
4. *Sistemy upravlenija dizelnymi dvigateljami*. M.: ZAO “KZHI” Za rulem”, 2004.
5. Melnik, G. V. “Obzor dokladov po sistemam «Sommon Rail» na kongresse SIMAC-2004, Kioto.” *Dvigatelsestroenie* 2 (2006): 44–52.
6. Caterpillar Common Rail. Catalog. Web. 29 Nov. 2015 <<http://pdf.nauticexpo.com/pdf/caterpillar-marine-power-systems/caterpillar-common-rail/19997-40609.html>>.
7. Haas, Stefan. “Introduction of the Caterpillar Common Rail on M32 engine family - Operational experience.” *Ship&Offshore/Schiff&Hafen* 3 (2010): 37–38.
8. Heller, Marc-Tran, and Alexander Jaufmann. “The new HEINZMANN Common-Rail and EFI Engine Control System for medium-speed and high-speed engines.” *Ship&Offshore/Schiff&Hafen* 3 (2010): 88–89.
9. Vogt, Erich, Steffen R. Jung, and Marco Poletti. Economical and technical aspects of DUAP’s fuel Injection parts and systems. Web. 22 Jan. 2015 <http://www.duap.ch/wp-content/uploads/2013/07/paper131_cimac_2010.pdf>.
10. Matsumoto, Shuichi, Koichi Yamada, and Kenji Date. *Concepts and Evolution of Injector for Common Rail System*. No. 2012-01-1753. SAE Technical Paper, 2012. DOI: 10.4271/2012-01-1753
11. Matsumoto, S., C. Klose, J. Schneider, N. Nakane, D. Ueda, and S. Kondo. *4 th Generation Diesel Common Rail System: Realizing Ideal Structure Function for Diesel Engine*. No. 2013-01-1590. SAE Technical Paper, 2013. DOI: 10.4271/2013-01-1590.

12. Jay, David, Arto Jaervi, and Kenneth Ehrstrom. "Common rail experiences & new developments — 4-stroke Wärtsilä engines." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 1040–1056.
13. Jay, David C., D. Delneri, and F. Cavressi. "Latest fuel injection systems on medium speed engines used for IMO tier 3 requirements in 2016." *Fuel Systems for IC Engines* (2012): 89–102. DOI:10.1533/9780857096043.4.89.
14. Ivanov, M. Yu, V. A. Shishkin, and A. P. Petrov. "Present-Day Mid- & High-Speed Diesel Engines Featuring Electronic Controls." *Dvigatelsestroyeniye* 4 (2006): 40–45.
15. Senghaas, Clemens, Schneider Hartmut, Reinhard Steffen, Jay David and Ehrstroem Kenneth. "New Heavy Fuel Oil Injection System." *MTZ worldwide eMagazine* January 72.1 (2011): 10-15.
16. Senghaas, Clemens, Marius Ligensa, and Klaus Reischmann. New platform based Common Rail Injector for MTU series 1163. Web. 15 Sept. 2013 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
17. Rabe, R., M. Epp, C. Fink, H. Harndorf, and E. Hassel. "Fuel injection strategies for heavy fuel medium speed engines to comply with future emission limits." *Ship&Offshore* 3 (2010): 66. http://www.ihr-omagazin.de/eMags/emags_online_demo/ship_2010/index.html#66.
18. Fink, C., M. Dresche, J. R. Rabe, and H. Harndorf. Hydraulic measures to improve common-rail injection system performance - Impact of injection rate shaping on emissions of a medium speed diesel engine. Web. 23 Feb. 2015 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
19. Kech, J., M. Willmann, P. Gorse, and M. Boog. Common Rail Fuel Injection: Key technology for clean and economical combustion. Web. 22 Nov. 2014 <http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/white-papers/3100651_MTU_General_WhitePaper_CommonRail_2011.pdf>.
20. Heim, K., and M. Coppo. "Advanced Common Rail Injection for Medium Speed Engines." *MTZ industrial* 3.2 (2013): 28–35.
21. Coppo, Marco, Claudio Negri, Klaus Heim, and Alessio Banno. "Advanced HFO Common Rail Injector for Maximising the Performance of Medium Speed Engines." Web. 12 Dec. 2013 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
22. Brunner, Heinrich, Michael Betschart, and Stefan Fankhauser. "Common Rail Wärtsilä 2-Stroke Engines in Practice." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 995–1009.
23. Vogel, Christian, Guenter Heider, Stephan Haas, and Alfred Marzinek. "The new MAN 32/44 CR – efficient, clean and compact." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 36–46.
24. New HFO Common Rail System for Medium speed Diesel Engines. Web. 19 Feb. 2014 <<http://docslide.us/documents/man-common-rail-cimac1.html>>.
25. Shishkin, V. A., A. P. Petrov, and M. Yu. Ivanov. "Development of Two-Stroke Low-Speed Electronically-Controlled Diesel Engines." *Dvigatelsestroyeniye* 2 (2006): 26–31.
26. Heim, Klaus. "Latest developments of Wärtsilä low-speed engines to meet current and future customer demands." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 10–23.
27. Sugihara, Masahide, Koji Edo, and Takuma Tanida. "Creating a Whole Range of Benefits with the MITSUBISHI UEC Eco-Engine." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria 2* (2007): 1009–1019.
28. Hiraoka, Naohiro and Imanaka Katsumi. Exhaust Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine. Web. 22 Aug. 2013 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
29. Kendlbacher, Christoph, D. Blatterer, M. Bernhaupt. "The 2200 bar Modular Common Rail Injection System for Large Diesel and HFO Engines." // http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf, p. 12.
30. Rehlichler, Gerhard, Christoph Kendlbacher, and Martin Bernhaupt. "The Bosch Electronic Diesel Control System for Medium and High Speed Engines." Web. 22 May 2014 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
31. Heller, Marc-Tran, Tobias Stelzer, Mike Riegert and Shusheng Li. L'Orange Fuel Injection Systems in China & Asia -Past Experience, Today's Expertise and Examples for Tomorrow's Excellence. Web. 22 Nov. 2015 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.

32. Result Type 51223 - Energy Control Technologies on the Queen Mary 2. Web. 20 July 2014 <<http://www.woodward.com/searchpublications.aspx>>.
33. Bataev, A. A., and V. A. Bataev. *Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primenenie*. Novosibirsk: Publishing House of the Novosibirsk State Technical University, 2002.
34. Bataev, A. A., and V. A. Bataev. *Kompozicionnye materialy*. M.: Logos, Universitetskaja kniga. Serija Novaja universitetskaja biblioteka, 2006.
35. Mashinostroenie. Jenciklopedija. T. 3-6. Tehnologija proizvodstva izdelij iz kompozicionnyh materialov, plastmass, stekla i keramiki. M.: Mashinostroenie, 2006.
36. Dizelnye akkumuljatornye toplivnye sistemy COMMON RAIL (Bosch). M.: Izdatelstvo «Legion-Avtodata», 2010.
37. Oki, M., S. Matsumoto, Y. Toyoshima, and K. Ishisaka. *180MPa Piezo Common Rail System*. SAE Technical Paper. No. 2006-01-0274. DOI: 10.4271/2006-01-0274.
38. Oh, B, K. Lee, and M. Sunwoo. *Development of an Injector Driver for Piezo Actuated Common Rail Injectors*. SAE Technical Paper. No. 2007-01-3537. DOI: 10.4271/2007-01-3537.
39. Lazarev, V., J. Wloka, and G. Wachtmeister. *A Method for the Estimation of the Service Life of a Precision Guiding Interface "Needle - Nozzle Body" of a Common-Rail-Injector for High Rail Pressures*. SAE Technical Paper. No. 2011-01-2020. DOI:10.4271/2011-01-2020.
40. Minamino, Ryouta, Takao Kawabe, Hiroshi Omote, and Shusuke Okada. "Fuel injection concept for the future clean diesel engines." *Schiff&Hafen/Ship&Offshore* Sp. (2013): 8–9.
41. "The development of fuel systems of diesel engines (CIMAC Materials Congress 2013)." *Dvigatelsestroyeniye* 4 (2014): 46–57.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
spb-engine-prof@mail.ru
Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
app.polab@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivlyuk Gregory Evgenyevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
spb-engine-prof@mail.ru
Petrov Aleksandr Pavlovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
app.polab@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2015 г.

УДК 656.62.062.6/.8:54-133

Л. А. Хлюпин

ПРИЧАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАПРАВКИ СУДОВ КОМПРИМИРОВАННЫМ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ

Ресурс судового дизеля увеличивается при использовании в качестве моторного топлива природного газа. Практическое применение последнего затруднено отсутствием в настоящее время инфраструктуры для заправки судов природным газом. В статье представлены пять технических решений заправки судов сжиженным природным газом (СПГ) давлением 5 и 20 МПа. Выбранные значения давления газа позволяют максимально использовать отечественное оборудование, серийно выпускаемое для заправки автотранспорта. Приведены основные характеристики автогазозаправщиков. Рассмотрены типы конструкций набережной для различных гидрогеологических условий площадки в пунктах строительства причалов. Выполнена оценка размеров причального фронта, стоечного судна и стационарного причала в зависимости от длины расчётного судна. Предложены оптимальные варианты причального сооружения в

виде стационарного и плавучего причала. Показана зависимость удельных капиталовложений в строительство причальных устройств от технологии заправки и конструкции набережной. Затраты возрастают с повышением давления заправки КПП, но при этом возможен больший судовый запас газа. Минимальные затраты на строительство причальных устройств относятся к заправке судна КПП давлением 5 МПа с плавучего причала.

Ключевые слова: дизель, судно, природный газ, заправка.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ природного газа в качестве топлива для судовых дизелей является перспективным направлением решения задач повышения их ресурса, снижения эксплуатационных расходов и соответствия предстоящим требованиям по содержанию вредных веществ в отработанных газах [1] – [6]. Практическое применение природного газа в судовых дизелях в настоящее время сдерживается отсутствием необходимой инфраструктуры для заправки судов газовым топливом. Природный газ на судне может храниться в сжиженном или компримированном виде, что, во многом, определяется типом судна и условиями его эксплуатации [7] – [9]. Технические решения заправки судов компримированным природным газом отличаются от заправки сжиженным природным газом [10], [11] и потребовали отдельного исследования, основные положения которого изложены далее.

Задача исследования состояла в разработке технологии заправки и экономической оценке строительства причальных устройств для заправки судов компримированным природным газом. Исходными данными явились характеристики газа в трубопроводе, подводящем газ к причальному устройству, и гидрогеологические условия площадок в пунктах строительства причалов. Выбранные значения давления газа позволяют использовать отечественное оборудование, серийно выпускаемое для заправки автотранспорта. На начальном этапе исследования выполнена разработка технологии заправки, включающая технические решения на базе отечественного оборудования, позволяющего реализовать заправку судов внутреннего плавания компримированным природным газом давлением 5 и 20 МПа.

Причалы заправки судов компримированным природным газом (КПП) могут включать пять технических решений.

Для заправки судов КПП давлением 5 МПа (рис. 1):

- плавучий причал со стоечным судном, оборудованным устройствами газозаправки, с подводом газа от магистрального трубопровода;
- стационарный (береговой) причал, оборудованный устройствами газозаправки, с подводом газа от магистрального трубопровода.

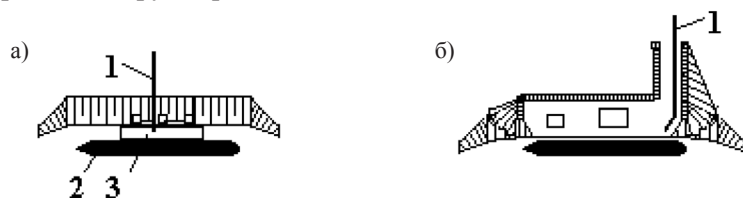


Рис. 1. Схемы заправки судов КПП давлением 5 МПа:

а — плавучий причал со стоечным судном; б — стационарный причал;

1 — магистральный газовый трубопровод; 2 — судно-газоход; 3 — стоечное судно

Для заправки судов КПП давлением 20 МПа (рис. 2):

- стационарный причал для заправки судов газом от передвижного автогазозаправщика [7], [12]. Например, ПАГЗ-2500-32, ПАГЗ-2800-32, ПАГЗ-3500-32, ПАГЗ-7000-32 (табл. 1);
- стационарный причал для заправки судов газом от газонаполнительной компрессорной станции (ГНКС), размещаемой в тыловой части причала;

– стационарный причал с прокладкой газопровода высокого давления для заправки судов газом от городской автомобильной ГНКС.



Рис. 2. Схемы заправки судов КПГ давлением 20 МПа со стационарного причала от:

а — передвижного автогазозаправщика; б — газонаполнительной компрессорной станции;

в — автомобильной газонаполнительной компрессорной станции;

1 — ПАГЗ; 2 — ГНКС; 3 — АГНКС; 4 — газопровод высокого давления

Таблица 1

Характеристики передвижных автогазозаправщиков

Показатели \ Автогазозаправщики	ПАГЗ-2500-32	ПАГЗ-2800-32	ПАГЗ-3500-32	ПАГЗ-7000-32
Автомобиль-тягач	МАЗ-504В		КамАЗ-54112	
Полуприцеп	ОдАЗ-9385			
Объём перевозимого газа, м³	2500	2800	3500	7000
Номинальное давление газа, МПа	32			
Газовые ёмкости: количество 				

Следующий этап исследования включал анализ возможных вариантов причальных устройств в виде стационарного причала или причала со стоечным судном. Тип конструкции набережной определяется гидрогеологическими условиями площадок в пунктах строительства причалов [13]. Так, для грунтов, позволяющих производить погружение железобетонных шпунтов и свай, применим больверк из заанкерowanego железобетонного шпунта. Для плотных грунтов применим больверк из заанкерowanego металлического шпунта или применимы гравитационные набережные из колодцев-оболочек. Для установки стоечного судна предпочтительным вариантом причального сооружения является строительство причально-отбойных железобетонных пал на свайном основании с укреплением спланированного откоса набережной железобетонными плитами на щебёночной подготовке. Длина стоечного судна и причального фронта может составить соответственно не менее 65 и 120 % от длины расчётного судна. Оптимальным вариантом причального сооружения стационарного причала является сплошная вертикальная набережная. Длина причальной набережной и причального фронта может составить соответственно 65 ... 85 % и 110 ... 120 % от длины расчётного судна. Ширина акватории стационарного причала или причала со стоечным судном может соответствовать трехкратной ширине расчётного судна.

Завершающим этапом исследования явилась экономическая оценка строительства причальных устройств. При постоянном изменении цен на материалы и оплату труда интерес представляет сравнение удельных затрат по сооружению рассматриваемых типов причальных устройств. Удельные капиталовложения определяются отношением общих капиталовложений в строительство каждого причала к длине причала (причального фронта) [14]. Минимальные удельные капиталовложения (табл. 2) относятся к заправке судов КПГ (5 МПа) от магистрального трубопровода,

если устройства заправки размещать на плавучем причале (стоечном судне). Те же устройства заправки, размещаемые на стационарном причале, увеличат удельные капиталовложения в 1,2 ... 4 раза в зависимости от размеров причала и типа конструкции набережной.

Несмотря на более высокие удельные капиталовложения, которые потребуются для заправки судов КППГ (20 МПа), они более оправданы, поскольку хранение на судах запаса природного газа при низком давлении существенно ограничивает их автономность плавания [15]. При равной длине причала и высоте причальной набережной для заправки судов КППГ (20 МПа) максимальные удельные капиталовложения будут при использовании колодцев-оболочек, а минимальные — металлического шпунта. Разница в удельных капиталовложениях при одинаковой высоте причальной набережной с увеличением длины причала существенно сокращается. Объясняется это включением в сметную стоимость строительства причалов затрат на выполнение подготовительных работ площадки строительства, образование акватории и территории причала, строительство объектов основного производственного назначения, включая строительство гидротехнических сооружений и устройств газозаправки, других объектов подсобного и вспомогательного назначения. Понятно, что доля перечисленных затрат в сметной стоимости строительства будет сокращаться с увеличением длины причала.

Таблица 2

Зависимость удельных капиталовложений в строительство причальных устройств от технологии заправки и конструкции набережной

Технология заправки	Длина причала (стоечного судна) / Высота причальной набережной, м	Изменение удельных капиталовложений, %			
		тип конструкции набережной			
		Причальные ж/б палы с берегоукреплением	Металлический шпунт	Железобетонный шпунт	Колодцы-оболочки
Заправка от магистрального трубопровода с плавучего причала	65(60)/—	83,7	—	—	—
	164(90)/—	44,2	—	—	—
Заправка от магистрального трубопровода с берегового причала	58/10	—	100	112,5	175
	154/10	—	51,8	61,2	101,2
Заправка от автогазозаправщика	58/10	—	137,6	156,3	225
	154/10	—	61,2	75,3	110,7
Заправка от ГНКС, размещаемой в тыловой части причала	58/10	—	275	287,6	350,1
	154/10	—	117,7	127,1	167,2
Заправка от городской автомобильной ГНКС	58/10	—	118,8	131,3	200
	154/10	—	61,2	70,6	108,3

Переход от непосредственной заправки автогазозаправщиком к заправке от ГНКС на территории причала повысит стоимость устройства газозаправки. При равной длине причала и высоте причальной набережной доля перечисленных затрат окажется выше и, соответственно, повысится стоимость строительства причала. Вариант с заправкой от городской автомобильной ГНКС предполагает существенное снижение стоимости устройства газозаправки и приведёт к одинаковым или меньшим удельным капиталовложениям, чем при непосредственной заправке от автогазозаправщиков. При этом характер изменения удельных капиталовложений при изменении длины причала сохранится.

Увеличение высоты причальной набережной с 6 м до 14 м повышает капиталовложения в строительство причала на 30 ... 80 %. Указанное изменение капиталовложений возможно и при одной высоте причальной набережной, построенной в разных территориальных районах. Минимальные значения относятся к территориям Москвы и Волгоградской области, а максимальные — к территориям Томской области и других (севернее 60-й параллели).

Выводы

Разработанные пять вариантов технических решений на базе отечественного оборудования позволяют реализовать заправку судов внутреннего плавания КПП давлением 5 и 20 МПа.

Выполненный анализ возможности строительства четырёх типов конструкции набережной выявил, что оптимальным вариантом причального сооружения в виде стационарного причала является сплошная вертикальная набережная, а плавучего причала — железобетонные палы с берегоукреплением.

Расчёты показали, что минимальные затраты на строительство причальных устройств возможны при заправке судна КПП давлением 5 МПа с плавучего причала, а более высокие затраты — давлением 20 МПа, которые оправданы в случае невозможности размещения на судне необходимого запаса газа при низком давлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goto S. Advanced medium speed gas engine for land and Sea / S. Goto, K. Watanabe, T. Hashimoto // MTZ industrial. — 2015. — Vol. 5. — № 2. — Pp. 32–39. DOI 10.1007/s40353-015-0525-6.
2. Sauerwein S. Improvements in efficiency of the MTU series 4000 gas engine / S. Sauerwein, U. Sander, B. Stiller // MTZ industrial. — 2012. — Vol. 2. — № 1. — Pp. 12–17. DOI 10.1365/s40353-012-0021-1.
3. Yang B. S. The prospective analysis of marine dual fuel engine application based on emission and energy efficiency / B. S. Yang, P. T. Sun, L. Z. Huang, D. Song // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 291–294. — Pp. 1975–1980. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.1975.
4. Bui Y. Machinery concepts and LNG for meeting IMO Tier III rules / Y. Bui // Wärtsilä Technical Journal: Marine/InDetail. — 2011. — Pp. 31–38.
5. Khan M. I. International experience with compressed natural gas (CNG) as environmental friendly fuel / M. I. Khan, T. Yasmin, A. Shakoor // Energy Systems. — 2015. — Vol. 6. — № 4. — Pp. 507–531. DOI: 10.1007/s12667-015-0152-x.
6. Callahan T. An Updated Survey of Gas Engine Performance Development. [Электронный ресурс] / T. Callahan, K. Hoag. — Режим доступа: https://shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 05.2013).
7. Техничко-экономическое обоснование применения газового топлива (сжиженного и сжатого газа) в отрасли речного транспорта РСФСР. — СПб.: СПГУВК, 1990.
8. ГОСТ 27577-2000. Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия. — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.
9. Хлюпин Л. А. Оценка безопасности использования природного газа на судах / Л. А. Хлюпин // Материалы международной научно-практической конференции «Водный транспорт России: инновационный путь развития», 6–7 октября 2010 г. — СПб.: СПГУВК, 2011. — Т. 2. — С. 329–333.
10. Бондаренко Е. В. Формирование сети заправочных станций компримированным природным газом / Е. В. Бондаренко, А. М. Федотов, Р. Т. Шайлин // Вестник Оренбургского государственного университета. — 2014. — № 10. — С. 23–29.
11. Хлюпин Л. А. Причалные устройства для заправки судов сжиженным природным газом / Л. А. Хлюпин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 125–128.
12. Пат. 2305224 РФ, МПК F 17 C 5/06, F 17 D 1/04. Способ заправки транспорта сжатым природным газом (варианты) и передвижная газозаправочная станция для его осуществления / А. В. Наумейко, С. А. Наумейко, А. А. Наумейко. 2006115705/06; Заявлено 06.05.2006; опубл. 27.08.2007. Бюл. № 24.

13. Нормы технологического проектирования портов на внутренних водных путях. Минтранс России. — М.: Гипроречтранс, 2002.
14. РСФСР МРФ. Сборник нормативных показателей удельных капитальных вложений и эффективности капитальных вложений по отрасли «Речной транспорт». — М.: Гипроречтранс, 1989. — 53 с.
15. Хлюпин Л. А. Автономность газохода / Л. А. Хлюпин // Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС: труды СПГУВК. — СПб.: СПГУВК, 2008. — С. 213–217.

MOORING FACILITIES FOR REFUELING OF VESSELS COMPRESSED NATURAL GAS

A resource of marine diesel engine increases when used as a motor fuel natural gas. The practical application of the latter is hampered by the lack of infrastructure for filling vessels with natural gas. The article presents five technical solutions for the refueling of ships with compressed natural gas (CNG) pressure of 5 and 20 MPa. Selected gas pressure allow maximum use of domestic equipment, commercially available for fueling vehicles. The main characteristics of avtogazservis. The types of waterfront structures for different hydrogeological conditions of the site at the point of construction of berths. Estimation of the size of the mooring front, rack the vessel and fixed mooring depending on the estimated length of the vessel. The best options proposed berthing facilities in the form of stationary and floating dock. The dependence of specific capital investments into construction of mooring devices the technology of refueling and construction of the embankment. Costs increase with the filling pressure of the CNG, but it is possible more marine reserves of gas. The minimum cost for the construction of the mooring devices are fueling CNG vessel pressure of 5 MPa with a floating dock.

Keywords: diesel engine, ship, natural gas, refueling.

REFERENCES

1. Goto, S., K. Watanabe, and T. Hashimoto. “Advanced medium speed gas engine for land and Sea.” *MTZ industrial* 5.2 (2015): 32–39. DOI 10.1007/s40353-015-0525-6.
2. Sauerwein S., U. Sander, and B. Stiller. “Improvements in efficiency of the MTU series 4000 gas engine.” *MTZ industrial* 2.1 (2012): 12–17. DOI 10.1365/s40353-012-0021-1.
3. Yang, Bing Song, P. T. Sun, L. Z. Huang, and D. Song. “The prospective analysis of marine dual fuel engine application based on emission and energy efficiency.” *Applied Mechanics and Materials*. 291–294 (2013): 1975–1980. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.1975.
4. Bui, Yves. “Machinery concepts and LNG for meeting IMO Tier III rules.” *Wärtsilä Technical Journal: Marine/InDetail* (2011): 31–38.
5. Khan, M. I., T. Yasmin, and A. Shakoar. “International experience with compressed natural gas (CNG) as environmental friendly fuel.” *Energy Systems* 6.4 (2015): 507–531. DOI: 10.1007/s12667-015-0152-x
6. Callahan, T., and Hoag K. An Updated Survey of Gas Engine Performance Development. Web: Special Ship and Offshore. May 2013 <https://shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.
7. Tehniko-jekonomicheskoe obosnovanie primenenija gazovogo topliva (szhizhennogo i szhatogo gaza) v otrasli rechnogo transporta RSFSR. SPb.: SPGUVK, 1990.
8. GOST 27577-2000. Gaz prirodnyj toplivnyj komprimirovannyj dlja dvigatelej vnutrennego sgoranija. Tehnicheskie uslovija. Minsk: Mezhsosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii.
9. Khlyupin, L. A. “Ocenka bezopasnosti ispolzovanija prirodnogo gaza na sudah.” *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Vodnyj transport Rossii: innovacionnyj put razvitija»*, 6–7 oktjabrja 2010 goda. SPb.: SPGUVK, 2011. Vol. 2: 329–333.
10. Bondarenko, E. V., A. M. Fedotov, and R. T. Shailin. “Formation of a gas stations network by compressed natural gas.” *Vestnik of the Orenburg State University* 10 (2014): 23–29.
11. Khlyupin, L. A. “Mooring facilities for refuelling of vessels liquefied natural gas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 125–128.
12. Naumeyko, A. V., S. A. Naumeyko, and A. A. Naumeyko. RU 2305224 C1, IPC 7 F17C005/06, F17D001/04. Sposob zapravki transporta szhatym prirodnym gazom (varianty) i peredvizhnaja gazozapravochnaja stancija dlja ego osushhestvlenija. Russian Federation, assignee. Patent 2305224. 6 May 2006.
13. Normy tehnologicheskogo proektirovanija portov na vnutrennih vodnyh putjah. Mintrans Rossii. M.: Giprorchtrans, 2002.

14. RSFSR MRF. Sbornik normativnyh pokazatelej udelnyh kapitalnyh vlozhenij i jeffektivnosti kapitalnyh vlozhenij po otrasli "Rechnoj transport". M.: Gipproechtrans, 1989.

15. Khlyupin, L. A. "Avtonomnost gazohoda." *Issledovanie, proektirovanie i jekspluatacija sudovyh DVS: Trudy SPGUVK*. SPb.: SPGUVK, 2008: 213–217.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Хлюпин Леонид Алексеевич —
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
Leonid-Khlupin@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Khlyupin Leonid Alekseevich —
PhD, associate professor,
senior researcher.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Leonid-Khlupin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2015 г.

УДК 621.436

**А. Б. Леонтьев,
А. А. Леонтьев,
В. Н. Макаров**

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ОТКАЗЫ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ

Надежность подшипников коленчатого вала судовых дизелей в значительной степени определяет надежность всего двигателя. Главной целью исследования было определение влияния изменения геометрических параметров подшипников скольжения в процессе эксплуатации двигателей на их отказы и разработка мер по повышению надежности. Основной причиной отказов подшипников скольжения коленчатых валов является абразивное изнашивание, которое обусловлено наличием абразивных частиц в моторном масле. На основании статистического анализа геометрических параметров результатов дефектации 26 коленчатых валов 13 типов судовых среднеоборотных дизелей (главных и вспомогательных) различных фирм-изготовителей (210 рамовых и 184 мотылевых шеек) было установлено распределение величин износа и овальности шеек, а также зависимости вероятности отказов коленчатых валов из-за задира шеек от величин износа и овальности шеек. Наибольшее влияние на возникновение задира оказывает величина овальности шеек — так, при величине овальности 0,03 мм вероятность задира составляет 30 %, а при величинах более 0,14 мм — 100 %.

Задача повышения надежности подшипников скольжения коленчатых валов может быть решена следующими путями:

- 1) ужесточением величин отклонений формы шеек коленчатого вала и масляного зазора;
- 2) ограничением содержания механических примесей в моторном масле;
- 3) формированием металлокерамических покрытий на шейках коленчатого вала для повышения износо- и задиростойкости.

Ключевые слова: надежность, износ, подшипник, коленчатый вал, вкладыш подшипника.

НАДЕЖНОСТЬ подшипников коленчатого вала судовых дизелей в значительной степени определяет надежность всего двигателя. Износы поверхностей трения трибоузла «шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника» оказывают решающее влияние на его долговечность, работоспособность и возникновение аварийных ситуаций на двигателе.

Цель работы — определение влияния эксплуатационных факторов на отказы подшипников коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей (СОД) для разработки мероприятий по по-

вышению их надежности. Принятие обоснованных мер по предотвращению внезапных отказов подшипников коленчатого вала позволяет предотвратить отказ дизеля.

Основными видами изнашивания шеек коленчатых валов и вкладышей подшипников являются [1] – [3]: абразивное, усталостное и окислительное, реже — изнашивание при заедании (адгезионное) и др. К основным факторам, определяющим скорость изнашивания и протекание физико-химических процессов при трении в условиях граничной или смешанной смазок, относятся: величина приложенной нагрузки, скорость взаимного перемещения, минимальная толщина масляного слоя, количество и дисперсность механических примесей в моторном масле, температура в зоне трения и совместимость и свойства материалов трущихся поверхностей.

Наибольшее влияние на процесс трения оказывают циклические механические нагрузки и температурное воздействие, так как они влияют на взаимодействие микронеровностей сопряженных поверхностей, а также на локальные деформации в поверхностном слое. Вследствие этого в приповерхностных слоях происходит как упругое деформирование, так и пластическое течение материала, приводящее к изменению структуры поверхностного слоя материала и образованию частиц износа. Вследствие изменения структуры поверхностного слоя его механические свойства также изменяются, а именно: нано- и микротвердость, модуль упругости и величина упругого восстановления, в результате этого изменяются триботехнические свойства и образуются частицы износа [4], [5]. Решить проблему деградации поверхностного слоя материала при трении возможно только при создании износостойких покрытий.

Наиболее существенное влияние на износ поверхностей трения подшипников оказывает величина содержания алюминия в работающем масле [6].

Максимальный износ в трибосопряжении располагается в зоне минимальной толщины масляного слоя, в результате формируется овальность шеек коленчатого вала. Моделирование изменения минимальной толщины смазочного слоя для различных типов дизелей позволило установить, что минимальная толщина масляного слоя зависит от угла поворота коленчатого вала и масляного зазора в подшипнике. С увеличением масляного зазора минимальная толщина масляного слоя снижается и превышает критическую (толщина слоя, при которой поверхности трения сопряженных деталей начинают соприкасаться вершинами микровыступов). Увеличение диаметрального зазора в подшипниках коленчатого вала приводит к переходу режима трения от гидродинамической смазки к граничной, уменьшению толщины смазочного слоя, и как следствие — возрастают скорости изнашивания и температура поверхностей трения и вероятность задира и расплавления антифрикционного слоя вкладыша. Толщина масляного слоя превышает критическую только при величинах, соответствующих установочным зазорам в сопряжении, причем часто только при их минимальных значениях. Например, для двигателя 8ZL 40/48 при зазоре в мотылевом подшипнике 0,2 мм (установочный зазор 0,20 – 0,34 мм) минимальная величина масляного слоя составляет 8 мкм, а критическая величина масляного слоя всего 6,5 мкм, при увеличении зазора до 0,285 мм минимальная величина масляного слоя составляет всего 3 мкм, которая существенно меньше критической, т. е. в сопряжении высокая вероятность изнашивания при заедании [7], [8]. Следует иметь в виду, что предельно допустимый зазор в сопряжении составляет 0,55 мм. Таким образом, нормальные условия работы сопряжения «шейка коленчатого вала — вкладыш подшипника» обеспечиваются при зазорах до 0,22 мм.

По мере роста величины износа и, соответственно, увеличения масляного зазора наблюдается возрастание угла, при котором минимальная толщина масляного слоя становится меньше критической.

Скорость изнашивания вкладышей шатунных подшипников в зависимости от вида смазочной системы, марки материала антифрикционного слоя вкладыша и типа СОД находится в весьма широких пределах — от 7,8 до 53,4 мкм/тыс. ч [2]. Величина скорости изнашивания шеек коленчатых валов СОД существенно зависит от наработки трибосистемы: максимальная величина для всех типов дизелей наблюдается в течение 1 тыс. ч, т. е. в период приработки и колеблется в интервале 2,9 – 22,5 мкм/тыс. ч для различных марок двигателей, затем постепенно снижается и стабилизи-

руется при наработке свыше 4 тыс. ч в интервале 1,5 – 5,2 мкм/тыс. ч [9] для дизелей, работающих на дизельном топливе, и 5,6 – 9,2 мкм/тыс. ч — для дизелей, работающих на тяжелых сортах топлива [3]. Величины скорости изнашивания шеек коленчатых валов после приработки имеют значительно меньшие величины по сравнению со скоростями изнашивания вкладышей. Значительный период приработки шеек коленчатого вала (около 4 тыс. ч) объясняется тем, что основную часть времени валы работают в условиях трения при гидродинамической смазке.

Для оценки влияния геометрических параметров шеек на отказы подшипников скольжения были проанализированы результаты дефектовочных актов 27 коленчатых валов 13 типов СОД различных дизелестроительных заводов (216 рамовых и 189 мотылевых шеек), на которых эксплуатируются закаленные, незакаленные и восстановленные наплавкой шеек коленчатые валы. Следует отметить, что величины износов и отклонений формы рамовых и мотылевых шеек коленчатого вала для конкретного дизеля иногда колеблются в широком диапазоне. На величины износов и отклонений формы существенное влияние оказывают величины твердости шеек вала и напряженность двигателя. Повышение твердости шеек вала позволяет значительно уменьшить величины износов шеек. Форсирование двигателя без изменения конструкции приводит к возрастанию скорости изнашивания и величин отклонений формы шеек.

Анализ отказавших коленчатых валов показал, что 93,8 % рамовых шеек имеют величины износов менее 0,10 мм (рис. 1, а). Более интенсивному износу подвержены мотылевые шейки, причем лишь 79,1 % шеек имеет величину износа до 0,10 мм (рис. 1, б). Задиры шеек имеют до 33 % валов, а деформацию — до 24 % валов.

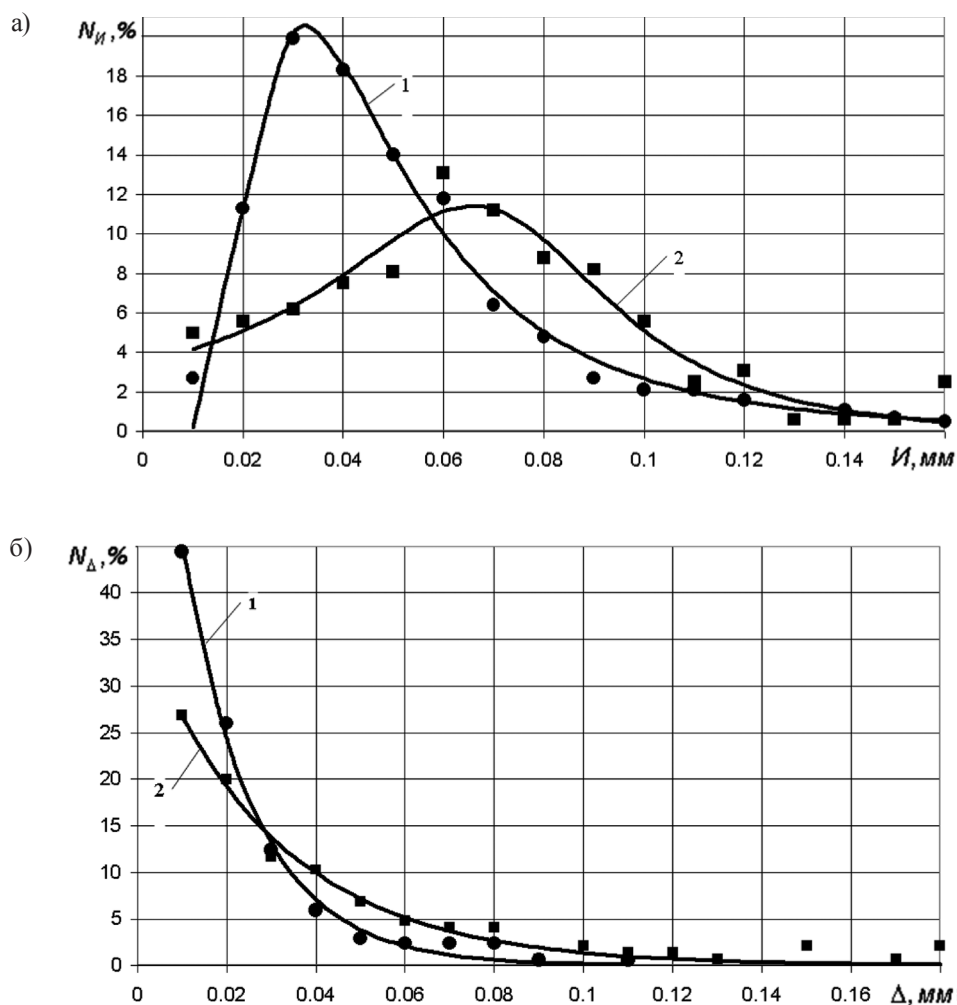


Рис. 1. Распределение величин износа (а) и овальности (б) шеек коленчатого вала рамовых (1) и мотылевых (2)

Распределение величин износа шеек коленчатых валов описываются выражениями:

– рамовые шейки (коэффициент корреляции $R^2 = 0,961$)

$$N_{\Pi}^P = 0,39^{-3} \cdot 0,87^{(1/I)} \cdot I^{-4,5}, \% \quad (1)$$

– мотылевые шейки ($R^2 = 0,989$)

$$N_{\Pi}^M = (3,45 - 17,1I) / (1 - 22,7I + 161I^2), \% \quad (2)$$

где N_{Π}^P — количество рамовых шеек с величиной износа N_P ; N_{Π}^M — количество мотылевых шеек с величиной износа N_I ; I — величина износа, мм.

Максимальные величины износа рамовых шеек коленчатых валов наблюдались на двигателях 6ЧСПН 18/22 (интервал величины износа 0,08 – 0,15 мм, средняя — 0,12 мм), мотылевых шеек на дизелях BAZAN-MAN (интервал величины износа 0,11 – 0,42 мм, средняя — 0,18 мм), 5L 20/27, TS 24 (интервал величины износа 0,03 – 0,43 мм, средняя — 0,09 мм).

В результате изнашивания шеек образуются отклонения формы от круглости и цилиндричности. Установлено (рис. 2), что 11,3 % рамовых и 31,1 % мотылевых шеек имеют овальность свыше 0,04 мм (предельно допустимая величина овальности для современных СОД с диаметром шеек 200 мм).

Распределение величин овальности шеек коленчатых валов описываются выражениями:

$$\text{– рамовые шейки } (R^2 = 0,961) N_{\Delta}^P = 82,8e^{-61,3 \cdot \Delta}, \% \quad (3)$$

$$\text{– мотылевые шейки } (R^2 = 0,989) N_{\Delta}^M = 37e^{-32,8 \cdot \Delta}, \% \quad (4)$$

где N_{Δ}^P — количество рамовых шеек с величиной овальности Δ_P ; N_{Δ}^M — количество мотылевых шеек с величиной овальности Δ_I ; Δ — величина овальности, мм.

Следует отметить, что между величиной износа трибоузла и вероятностью возникновения изнашивания при заедании и последующего задира шеек коленчатого вала существует качественная связь в условиях трения полужидкостной и граничной смазок. Анализ аварийных ситуаций показал, что наиболее часто заедание и заDIR шеек возникает при пуске двигателя на оборотах 50 – 75 % от номинальных, т. е. когда режим трения при смешанной смазке и масляный слой меньше критического или в смазке содержится повышенное количество механических примесей. Высокие скорость скольжения и нагрузка в условиях контакта поверхностей приводит к повышению температуры в зоне трения и к снижению механических свойств поверхностных слоев материалов сопряженных деталей и их триботехнических параметров, а также износу оксидных пленок и схватыванию ювенильных поверхностей.

У мотылевых шеек формируется преимущественно конусообразность, достигающая 0,10 мм. Рамовые шейки в результате износа приобретают по большей части овальную форму.

Наиболее опасны катастрофические виды изнашивания: заедание, заDIR и схватывание. При задирах шеек или схватывании шеек с вкладышем, а также расплавлении антифрикционного слоя вкладышей, как правило, происходит деформация коленчатого вала, реже — поломка вала. Первопричиной катастрофических видов изнашивания является, как правило, образование отклонений формы шеек вала.

Анализ влияния величин износа на вероятность задира шеек позволил установить, что износы рамовых и мотылевых шеек коленчатых валов оказывают существенное и примерно одинаковое влияние (рис. 2, а). Зависимость вероятности задира шеек от величины их износа описывается выражением ($R^2 = 0,958$)

$$P_3^I = 50,5 - 49,35 \cdot e^{-3071 \cdot I^{3,3}}, \% \quad (5)$$

Мотылевые шейки коленчатых валов, поступающих на восстановление, имеют большие величины износа, поэтому анализ влияния величин износа на вероятность задира шеек целесообразно проводить для них. Для обеспечения вероятности задира не более 10 % необходимо, чтобы износ шеек не превышал 0,05 мм. При величинах износа свыше 0,11 мм вероятность задира составляет 50 %.

Наибольшую опасность для возникновения задира оказывает величина овальности шеек (рис. 2, б). При величине овальности 0,03 мм вероятность задира составляет 30 %, а при величинах от 0,14 мм и больше — 100 %. Поэтому необходимо ограничивать овальность шеек для уменьшения вероятности возникновения задира и отказа коленчатого вала величинами 0,03 – 0,04 мм. Зависимость вероятности задира шеек от величины их овальности описывается выражением ($R^2 = 0,971$)

$$P_3^{\Delta} = 181,6 + 45,8 \ln(\Delta), \% \quad (6)$$

Задир мотылевых шеек коленчатых валов СОД наблюдается при их износе от 0,03 до 0,43 мм (средняя величина износа 0,11 мм), при этом овальность шеек находится в интервале 0,02 – 0,42 мм (средняя величина овальности 0,06 мм). Задир рамовых шеек коленчатых валов СОД наблюдается при значительно меньшем их износе от 0,02 до 0,12 мм (средняя величина износа 0,07 мм), при этом овальность шеек находится в интервале 0,01 – 0,08 мм (средняя величина овальности 0,04 мм). При этом при возникновении задира мотылевых шеек у 90 % коленчатых валов наблюдается также задир и рамовых шеек. Учитывая значительно меньший износ и отклонения формы рамовых шеек, а также значительно меньший уровень динамических нагрузок можно предположить, что основной причиной их задира являются резкие изменения механических и триботехнических параметров в подшипниковых узлах, возникающие при схватывании и задире в мотылевых подшипниках коленчатого вала.

Величины отклонения от цилиндричности шеек коленчатого вала оказывают на вероятность возникновения задира примерно такое же влияние, как и величина овальности, поэтому они также должны ограничиваться величинами 0,03 – 0,04 мм.

Задир шеек приводит к деформации коленчатых валов, которая характеризуется величиной биения на рамовых шейках и достигает 0,5 – 0,7 мм. Величины биения рамовых шеек у 76 % коленчатых валов, поступающих в ремонт, находятся в допустимых пределах. Возникновение деформаций коленчатых валов вследствие задира рамовых шеек наблюдается у 40 % валов, при задире мотылевых шеек — у 60 % валов.

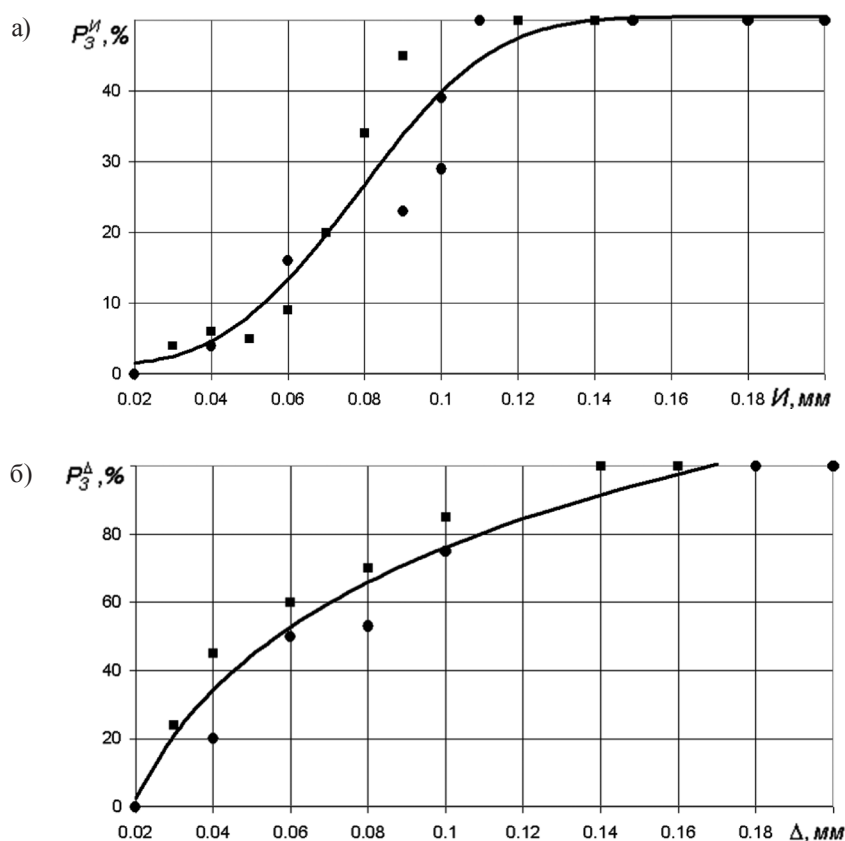


Рис. 2. Зависимость вероятности отказов коленчатых валов из-за задира шеек от величин износа шеек (а) и овальности шеек (б):
■ — рамовые; ● — мотылевые шейки

Для определения изменения параметров шероховатости шеек вала в процессе эксплуатации были проведены триботехнические испытания образцов из стали 40Х. Параметры шероховатости и топографию поверхности трения изучали на приборе ContourGT-I 3D Optical Microscope фирмы Bruker.

Триботехнические испытания проводили по методике, приведенной в работе [10].

Анализ параметров шероховатости (см. табл., рис. 3) и топографии поверхностей стальных образцов после шлифования и триботехнических испытаний, полученных на оптическом профилометре ContourGT-K фирмы *Bruker*, позволил установить, что минимальные величины микро-неровностей совпадают с направлением вращения образца. В результате приработки и явлений, сопровождающих трение в условиях граничной смазки, происходят существенные изменения микрогеометрии и топографии поверхности трения (рис. 3 и 4). Параметры шероховатости вала в процессе трибоиспытаний в направлении, перпендикулярном направлению вращения, не изменяются, а по направлению вращения уменьшаются примерно в два раза (см. таблицу). Однако вследствие наличия механических примесей в смазке происходит образование большого количества острых пиков на поверхности стали, которые при контактировании сопряженных поверхностей на режимах трения при граничной или смешанной смазках, особенно на частотах вращения двигателя свыше 50 % от номинальной, резко повышает вероятность схватывания и перехода к адгезионному изнашиванию и как следствие — к задиру шеек, проворачиванию вкладышей, деформации коленчатого вала, реже — к расплавлению антифрикционного слоя и поломке коленчатого вала.

Наличие абразивных частиц в циркуляционном масле в процессе эксплуатации двигателей приводит к увеличению параметров шероховатости шеек коленчатых валов, так при исходных $R_a = 0,20 - 0,28$ мкм происходит возрастание до $R_a = 0,47 - 0,57$ мкм, т. е. примерно в два раза. На основании триботехнических испытаний можно сделать вывод, что при исходной шероховатости $R_a = 0,65$ мкм увеличения параметров среднего арифметического отклонения профиля в процессе трения не происходит. Следовательно, полировать шейки коленчатых валов до $R_a = 0,32$ мкм нецелесообразно.

Таблица

**Параметры шероховатости образцов из стали 40X
после шлифования и триботехнических испытаний**

Вид обработки стали или испытания	Параметры шероховатости	
	R_a , мкм	R_z , мкм
После шлифования	0,65 / 0,40	3,54 / 2,57
После триботехнических испытаний	0,62 / 0,18	4,00 / 1,93

Примечание. В числителе приведено значение параметра, перпендикулярно направлению вращения образца при механической обработке или трибоиспытаниях, в знаменателе — по направлению вращения образца.

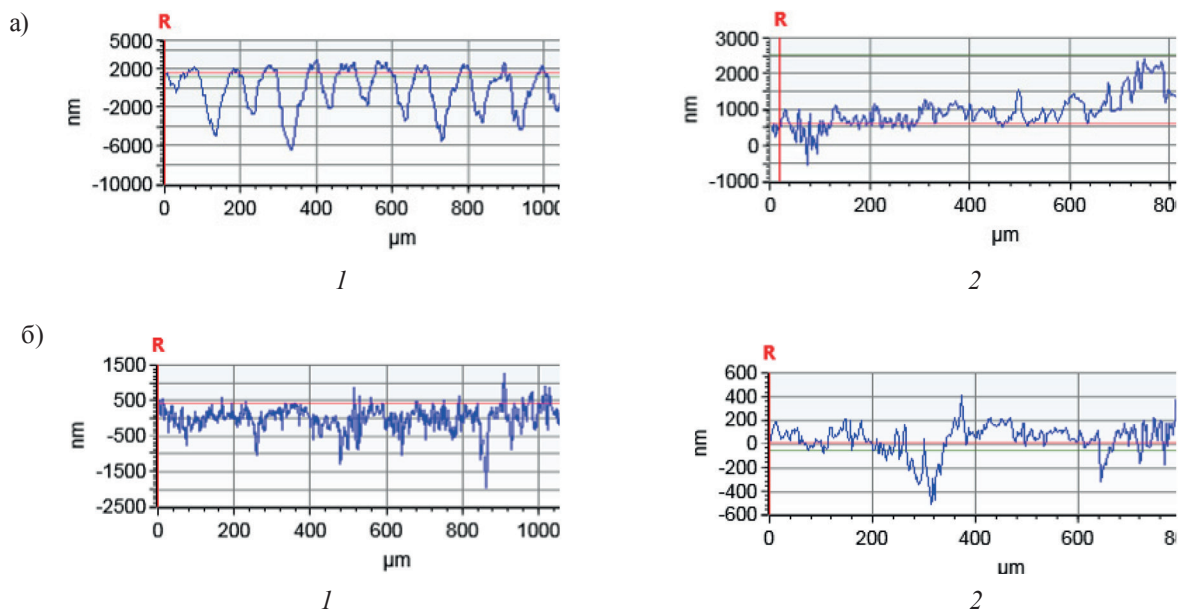
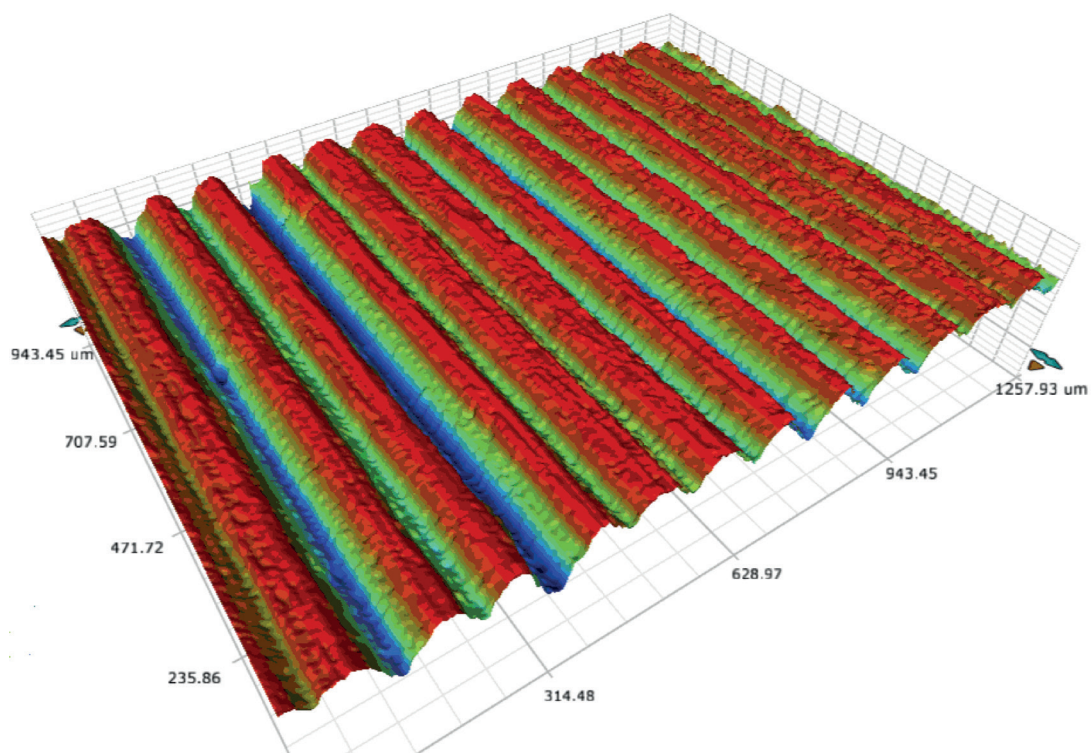


Рис. 3. Профилограммы микронеровностей поверхностей стали 40X, после шлифования (а); после трибоиспытаний (б);

1 — перпендикулярно направлению вращения образца; 2 — по направлению вращения образца

а)



б)

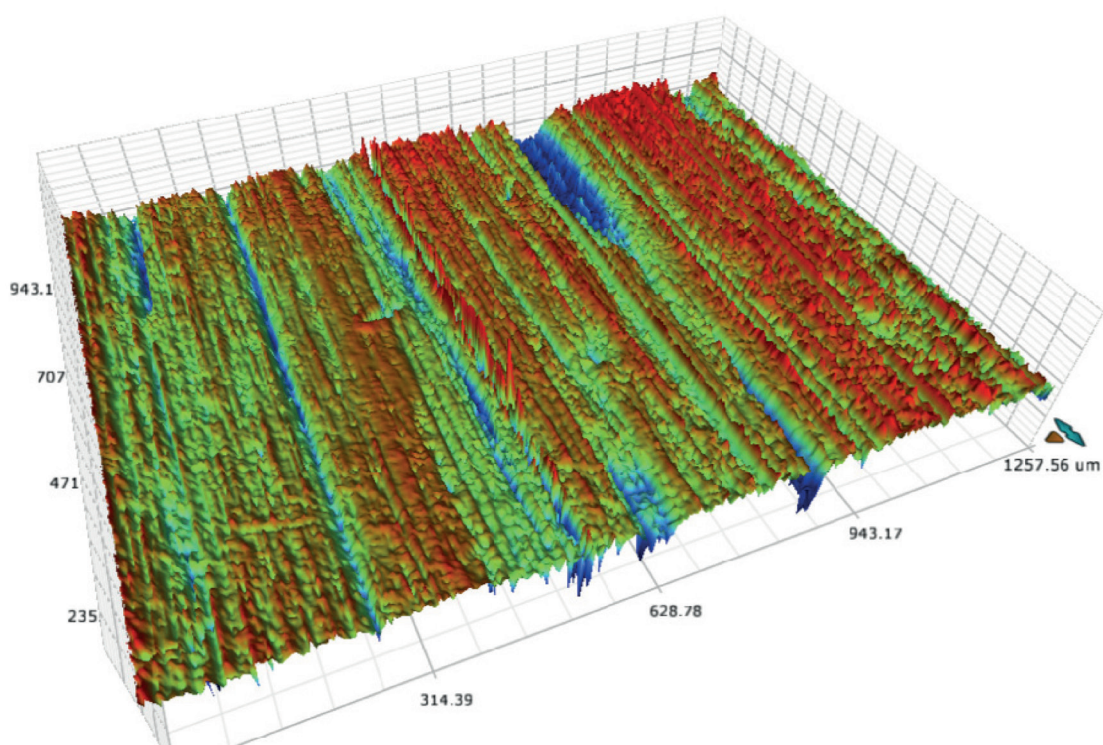


Рис. 4. Топография поверхности стали 40Х после шлифования (а);
после трибоиспытаний (б)

При ремонте коленчатых валов не решается проблема повышения износостойкости шеек. Для повышения надежности подшипников скольжения коленчатых валов СОД и снижения скоро-

сти изнашивания сопряженных поверхностей трения и вероятности аварий двигателя из-за зади-
ров шеек необходимо формировать на их поверхностях металлокерамические покрытия, которые
позволяют существенно уменьшить коэффициент трения в подшипнике при граничной смазке,
а также увеличить изно- и задиростойкость [10]. Наиболее эффективными материалами для фор-
мирования тонкопленочных износостойких покрытий на шейках коленчатых валов являются ком-
позиты на основе вермикулита [11].

Заключение

Проведенные исследования позволили установить:

- основной причиной отказов подшипников скольжения коленчатых валов СОД является абразивное изнашивание, в первую очередь — мотылевых шеек коленчатого вала, которое обусловлено наличием абразивных частиц в моторном масле, завышенными величинами отклонений формы поверхностей шеек и масляных зазоров в сопряжении, которые, в свою очередь, приводят к контакту поверхностей деталей в режиме работы дизеля даже на номинальной и близкой к номинальной частотах вращения двигателя;
- наибольшую опасность для возникновения задира оказывает величина овальности мотылевых шеек. При величине овальности 0,03 мм вероятность задира составляет 30 %, а при величинах от 0,14 мм и больше — 100 %. Поэтому необходимо ограничивать овальность шеек для уменьшения вероятности возникновения задира и отказа коленчатого вала величинами 0,03–0,04 мм;
- повышение надежности подшипников скольжения коленчатых валов может быть достигнуто при выполнении следующих технических требований:
 - 1) ужесточением величин отклонений формы шеек коленчатого вала и масляного зазора;
 - 2) ограничением содержания механических примесей в моторном масле, особенно алюминия;
 - 3) повышением износо- и задиростойкости шеек коленчатого вала технологическими методами, например формированием тонкопленочных металлокерамических покрытий.

Исследование выполнено при поддержке ДВФУ, проект №14-08-03-8_и.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев Л. Б. Причины отказов коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей и пути повышения их надежности / Л. Б. Леонтьев, А. Г. Токликишвили // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2012. — № 3(12). — С. 40–47.
2. Кича Г. П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г. П. Кича, Б. Н. Перминов, А. В. Надежкин. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. — 372 с.
3. Буравцев С. К. О состоянии характеристик коленчатых валов и их влиянии на показатели двигателя // Двигателестроение. — 2006. — № 1. — С. 38–42.
4. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М.: Физматлит, 2007. — 368 с.
5. Рубцов В. Е. Моделирование деформационных и тепловых процессов в поверхностном слое упруго-пластического материала при трении: дис. ... канд. физ.-мат. наук / В. Е. Рубцов. — Томск: Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН, 2004. — 145 с.
6. Леонтьев Л. Б. Анализ функционирования трибосистемы шейки коленчатого вала — вкладыш подшипника — смазка судовых среднеоборотных дизелей / Л. Б. Леонтьев, А. В. Надежкин, В. Н. Макаров, А. Г. Токликишвили // Двигателестроение. — 2013. — № 2. — С. 41–47.
7. Надежкин А. В. Моделирование влияния степени изношенности подшипников скольжения судовых дизелей на режим трения и виды изнашивания / А. В. Надежкин, М. Е. Старченко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 1. — С. 120–124.
8. Голенищев А. В. Моделирование влияния эксплуатационных факторов на режимы трения и изнашивания в подшипниках скольжения судовых дизелей / А. В. Голенищев, А. В. Надежкин, М. Е. Старченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2015. — Т. 1. — № 3 (29). — С. 108–113.

9. Яхьяев Н. Я. Прогнозирование работоспособности судовых двигателей внутреннего сгорания по износу деталей в узлах трения: дис. ... д-ра техн. наук / Н. Я. Яхьяев. — Махачкала: ДГТУ, 2003. — 295 с.

10. Леонтьев Л. Б. Упрочнение поверхностей трения стальных деталей трибомодификацией органическими материалами / Л. Б. Леонтьев, Н. П. Шапкин, А. Л. Леонтьев, А. Г. Токликишвили // Металлообработка. — 2015. — № 5 (89). — С. 32–39.

11. Шапкин Н. П. Органосиликатные антифрикционные композиты на основе вермикулита для формирования покрытий на поверхностях трения стальных деталей / Н. П. Шапкин, Л. Б. Леонтьев, В. Н. Макаров, И. Г. Хальченко, В. В. Короченцев // Журнал прикладной химии. — 2014. — Т. 87. — № 12. — С. 1727–1734.

INFLUENCE OPERATIONAL FACTORS ON FAILURE BEARING CRANKED SHAFTS OF MARINE MEDIUM-SPEED DIESELS AND WAYS TO IMPROVE THEIR RELIABILITY

The reliability of marine diesel engines depends on the reliability of the crankshaft bearings. The use of heavy grades of fuel causes an increase in the rate of wear of the friction surfaces.

The main objective of the study was to determine the impact of changes in the geometric parameters of bearings in the operation of the engines on their failures and development of measures to improve the reliability.

The main reason for failure of plain bearings of crankshafts is abrasive wear, which is caused by the presence of abrasive particles in the engine oil. Based on statistical analysis of the geometric parameters of the results of fault detection 26 crankshafts 13 types of medium-speed diesels (main and auxiliary) of different manufacturers (210 crank-journal and 184 crank-pin necks) found the distribution of wear and ovality of necks, as well as dependence of the probability of failures of crankshafts due to bad necks from the values of the wear and ovality of necks. The greatest influence on the occurrence of a bulge has ovality value of necks, so if the value of ovality of 0.03 mm probability of a bulge is 30%, while values of more than 0.14 mm - 100%.

The task of improving the reliability of plain bearings of crankshafts can be solved in the following ways:

- 1) decrease of deviations size the crankshaft journals and the oil clearance;*
- 2) restriction of the content of mechanical impurities in the engine oil;*
- 3) the formation of metal-ceramic coatings on necks of the crankshaft for durability improvement.*

Keywords: Reliability, wear, bearing crankshaft bearings.

REFERENCES

1. Leontyev, L. B., and A. G. Toklikishvili. "Causes of failure crankshafts marine medium-speed diesel engines and ways of increasing their reliability." *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta* 3(12) (2012): 40–47.

2. Kicha, G. P., B. N. Perminov, and A. V. Nadezhkin. *Resursosberegajushhee masloispol'zovanie v sudovyh dizeljah*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2011.

3. Buravtsev, S. K. "Post-Repair Crankshaft Conditions and Their Influence on Engine Performance." *Dvigatelsestroyeniye* 1 (2006): 38–42.

4. Myshkin, N. K., and M. I. Petrokovec. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii*. M.: Fizmatlish, 2007.

5. Rubcov, V. E. *Modelirovanie deformatsionnyh i teplovyh processov v poverhnostnom sloe uprugoplasticheskogo materiala pri trenii*: PhD diss. Tomsk: In-t fiziki prochnosti i materialovedeniya SO RAN, 2004.

6. Leontyev, L. B., A. V. Nadezhkin, V. N. Makarov, and A. G. Toklikishvili. "Functional Analysis of «Crankshaft Journal-Bearing Liner-Lube Oil System of Marine Medium Speed Diesel Engine» Tribosystem." *Dvigatelsestroyeniye* 2 (2013): 41–47.

7. Nadezhkin, A. V. and M. E. Starchenko. "Modeling the influence between the degree of wear bearings in marine diesel engines and their friction regime and the type of wear." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 1 (2015): 120–124.

8. Golenishev, A. V., A. V. Nadezhkin, and M. E. Starchenko. "Modeling the influence of operational factors on modes of friction and wear in the bearings of marine diesels." *Marine intellectual technologies* 1.3(29) (2015): 108–113.

9. Jah'jaev, N. Ja. Prognozirovanie rabotosposobnosti sudovyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya po iznosu detalej v uzlah treniya: Dr. diss. (Tech.). Mahachkala: DGTU, 2003.

10. Leontev, L. B., N. P. Shapkin, A. L. Leontev, and A. G. Toklikishvili. "Hardening of the friction surfaces of steel parts tribomodifikatsiey organoneorganicheskiimi materials." *Metalworking* 5(89) (2015): 32–39.

11. Shapkin, N. P., L. B. Leontev, V. N. Makarov, I. G. Khal'chenko, and V. V. Korochentsev. "Vermiculite-Based Organosilicate Antifriction Composites as Coatings on Friction Surfaces of Steel Articles." *Russian journal of applied chemistry* 87.12 (2014): 1727–1734.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонтьев Лев Борисович —
доктор технических наук, профессор.
Дальневосточный федеральный университет
leontyev.l.b@yandex.ru
Леонтьев Андрей Львович —
кандидат технических наук.
Дальневосточный федеральный университет
gfi25leontev@mail.ru
Макаров Василий Николаевич — аспирант.
Научный руководитель:
Леонтьев Лев Борисович.
Дальневосточный федеральный университет
makarov_vasily@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Leontev Lev Borisovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Far Eastern Federal University
leontyev.l.b@yandex.ru
Leontev Andrew Lvovich — PhD.
Far Eastern Federal University
gfi25leontev@mail.ru
Makarov Vasily Nikolaevich — Postgraduate.
Supervisor:
Leontev Lev Borisovich.
Far Eastern Federal University
makarov_vasily@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 декабря 2015 г.

УДК 678,67.014,67.017,67.019

Е. Н. Белецкий

РАЗЛИЧНЫЕ УРОВНИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ОТДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОТОРЫХ ВЫПОЛНЕННЫ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассмотрен новый многоуровневый подход к моделированию сложных трибосопряжений судового движительного комплекса, отдельные элементы которых выполнены из композиционных полимерных материалов. Трибосистема в процессе моделирования рассматривается как сложная, зависящая от множества критериев. Представлены различные варианты управления сложной трибосистемой, содержащей элементы композиционных материалов, в частности — активного управления на основе вне-сечения дополнительной энергии и пассивного за счет дифференцированного учета откликов системы на внешнее воздействие, и изменений, возникающих в обратных связях. Предложен новый комплексный подход при моделировании, который включает решение задачи оптимизации и выбор векторного критерия показателей эффективности работы системы. Получены новые зависимости для динамических критериев качества сложной трибосистемы или целевых функций на основе способа линейной свертки.

Ключевые слова: композиционные материалы, моделирование трибосопряжений, механическая обработка, граничные условия, критерии оптимизации, вектор состояния, параметры качества.



СОВРЕМЕННОМ судостроении для широкого спектра функциональных устройств движительного комплекса широко используются новые композиционные полимерные материалы (КПМ). В первую очередь, эти материалы приходят на смену традиционно

используемым конструкционным материалам триботехнического назначения. КППМ обладают рядом преимуществ по сравнению с металлами и сплавами. Так, они обладают высокими удельными прочностными и упругими характеристиками, инертны к агрессивным химическим средам, могут адаптироваться к широкому диапазону температур, обладают низкой тепло- и электропроводностью, высокой износостойкостью, способны работать в режиме граничного и сухого трения и т. п.

Однако наряду с преимуществами имеются и существенные ограничения, в первую очередь связанные со слишком широким спектром материалов, предлагаемым современным товарным рынком, а так же с малой изученностью «прикладных» физико-механических характеристик данных материалов и их адаптацией при решении конкретных инженерных задач. В современных конструкторских бюро и технических отделах производственных предприятий порой полностью отсутствуют справочные и нормативные данные, алгоритмы и единые подходы при выборе тех или иных марок КППМ. [1] – [3]. Поэтому весьма актуально на базе накопленного опыта расчетно-экспериментальных работ крупнейших отечественных производителей изделий из композиционных материалов судостроительной отрасли и смежных отраслей создать алгоритмы и информативно-содержательные расчетные модели при проектировании узлов из КППМ, а также модели технологических процессов формообразования из изготовления деталей из композиционных полимерных материалов, в том числе триботехнического назначения.

Задачи моделирования и управления сложными триботехническими системами содержащие элементы КППМ

В трибосопряжениях, входящих в состав судовых энергетических установок, таких как дейдвудные подшипники, торцевые и лабиринтные уплотнения насосов и т. п., происходят сложные физико-химические процессы. Поэтому научиться моделировать и управлять этими процессами еще на этапах проектирования и подготовки производственного цикла изделия — весьма актуальная задача. На сегодняшний день можно рассмотреть два основных существующих способа управления сложными процессами контактного взаимодействия в трибосопряжениях (рис. 1), содержащих КППМ: активное управление и пассивное [4] – [6], причем оба способа основаны на контроле энергетических потоков в рассматриваемой системе. В свою очередь, активное управление предусматривает внесение дополнительной энергии в зону трения или изменения характера потока (интенсивности, цикличности, использования источников комбинированного воздействия и т. п.). Кроме этого на всех этапах «энергетического воздействия» на систему предусматривается система обратных связей, позволяющих оптимизировать процесс и дозированно воздействовать на трибосистему. Все остальные способы воздействия на трибосистему относят к пассивному управлению. На практике для сложных систем, к которым относят и трибосистемы, широко используют структурно-параметрический синтез. Согласно данному подходу, искусственно, на этапах проектирования и расчетов конструкции, фиксируют компоненты системы, например, характер трения и конструктивное исполнение пары: вал — втулка, вал — торцевое уплотнение, направляющая — ползун, а изменяются при этом только параметры системы. К данным параметрам можно отнести: состав и свойства прокачиваемой среды через трибосопряжение (соленость воды, кислотная или щелочная составляющая, наличие абразива и поверхностно-активных веществ и т. п.) [6] – [8].

В зависимости от поставленных задач для пар трения, содержащих детали и отдельные элементы из КППМ, в понятие эффективности работы отдельного узла или агрегата в целом может быть вложен разный смысл. Например, функциональные критерии наименьших материальных и энергозатрат, а следовательно и более упрощенной и дешевой технологии изготовления при наилучшей работоспособности узла трения, с полным обеспечением требуемого эксплуатационного качества в течение всего срока ее эксплуатации. Регламентированные заранее требования (как на этапах проектирования, так и на этапах подготовки производственного цикла) могут вступать в противоречия между собой. Причем противоречия и «непреодолимые ограничения» могут быть как технического, так и организационно-финансового плана. Например, противоречия, связанные с эксплуатационными показателями изделия (такими как сокращенные сроки приработки пар

трения и выход на оптимальный период эксплуатации; достижение наибольшей износостойкости контактирующих деталей пар трения; обеспечение задиростойкости в режимах экстремальных нагрузок и нештатных ситуациях) могут быть непреодолимы из-за отсутствия финишных отделочных технологий, в том числе и механической обработки на действующем производстве, или существенных финансовых затрат на их покупку. Поэтому на этапах проектирования и подготовки производства изделий из КПП важно решать не только организационно-финансовые задачи, но и задачи оптимизации, в том числе с назначением технически и финансово обоснованных, правильных *критериев оптимизации*. При моделировании процессов такая задача может быть как *одно-критериальной* (например, по финансовым затратам), так и *многокритериальной*, что усложняет решение. Существенные ограничения связаны с требованиями обеспечения эксплуатационных параметров качества и качества поверхностного слоя отдельных деталей, определяющих работоспособность трибосопряжения (рис. 2). Основные ограничения по показателям качества ответственных деталей, выполненных из КПП, представлены в табл. 1.

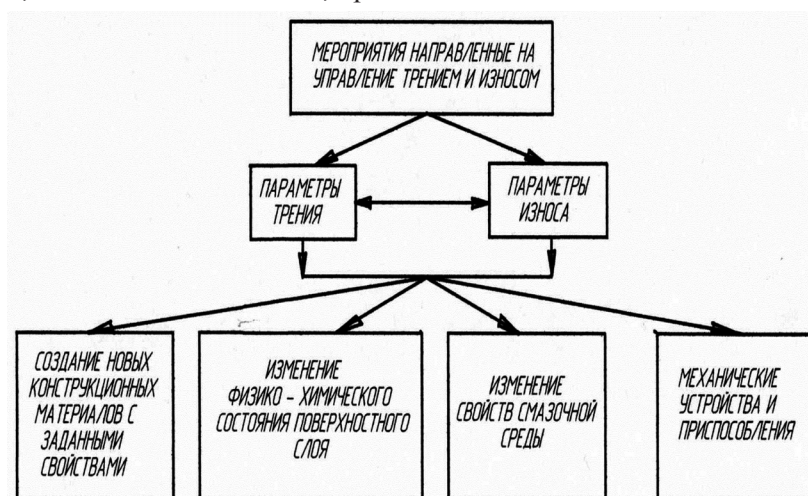


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая мероприятия, направленные на управление процессами в трибосопряжениях, в том числе пар трения, содержащих детали, выполненные из КПП

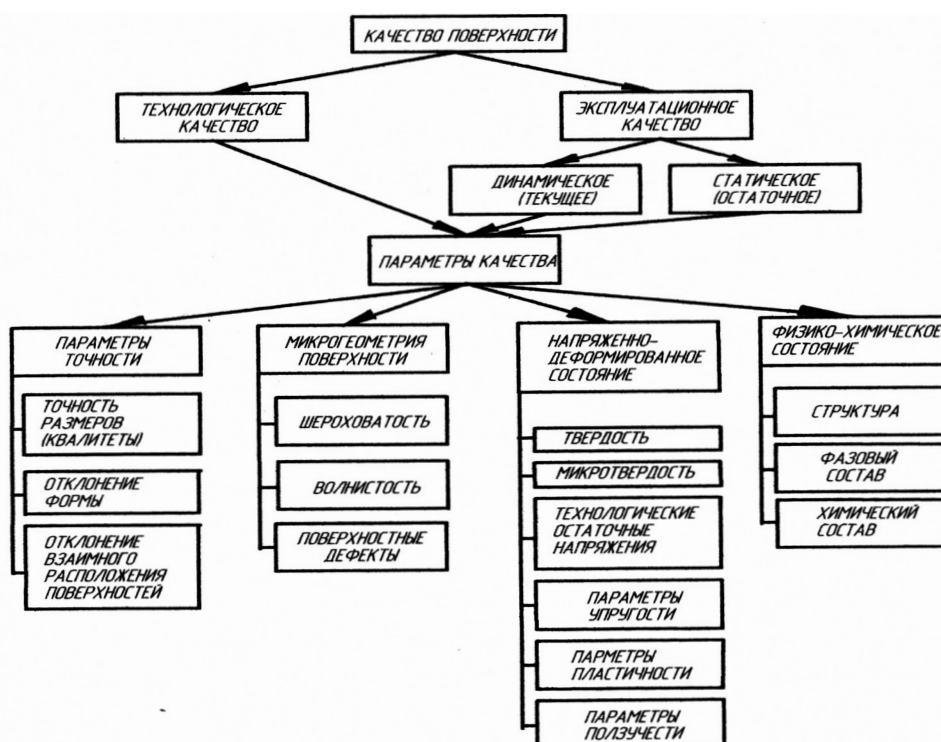


Рис. 2. Параметры качества поверхностного слоя деталей трибосопряжения при нормальном трении

Таблица 1

**Ограничения по показателям качества ответственных деталей пар трения,
выполненных из КПМ
(функция состояния эксплуатационных показателей качества изделий)**

№ п/п	Наименование показателя	Вид зависимости	Используемые в зависимостях параметры и показатели
1	Ограничения по шероховатости поверхности	$R_z = R_z(V, S, \dots) \leq R_{zd}$	R_z — величина микронеровностей, мкм; R_{zd} — допустимое значение R_z , диктуемое служебным назначением детали или тех- нологическими соображениями, мкм
2	Ограничения по волнистости поверхности	$W_{\max} = W_{\max}(V, S, \dots) \leq W_{\max d}$	$W_{\max}$ — величина максимальной длины волны, мм; $W_{\max d}$ — допустимое значение $W_{\max}$, диктуемое служебным назначением детали или технологическими соображе- ниями длина волны, мм
3	Погрешность гео- метрической формы изделия (деформативность системы под дей- ствием внешних сил)	$Y = Y(V, S, \dots) \leq Y_d$	Y — величина погрешности обработки, вызванная упругими перемещениями в технологической системе и размерным износом режущего инструмента, мкм; Y_d — допустимое значение деформатив- ности системы, мкм
4	Ограничения по технологическим остаточным напряжениям	$\sigma = \sigma(V, S, \dots) \leq \sigma_d$	σ — величина средних внутренних напря- жений, Н/мм ² ; σ_d — допустимое значение напряжений σ , диктуемое служебным на- значением детали, Н/мм ²
5	Ограничения по микротвердости функциональной поверхности	$H_v = H_v(V, S, \dots) \leq H_{vd}$	H_v — величина твердости (микротвердо- сти) поверхности, Н/мм ² ; H_{vd} — допус- тимое значение H_v , диктуемое требова- ниями чертежа, Н/мм ²

В общем виде постановка задачи оптимизации по техническим показателям, отвечающим за эксплуатационные характеристики системы и параметры установившегося процесса трения, может быть представлена как задача оптимального синтеза трибосопряжения с векторным критерием оптимальности на основе локальных критериев [4], [6], [9], [10]. В общем виде этапы решения задачи оптимизации по техническим параметрам представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные этапы решения задачи оптимизации для трибосистем,
содержащих элементы КПМ в виде отдельных деталей или элементов конструкций**

№ п/п	Наименование этапа	Характеристика	Основные подходы при моделировании, зависимости, параметры
1	Оценка неопределенностей решения	Неопределенность целевой функции из-за: — неопределенности цели исследования (определение компромисса) — вида используемой модели — неопределенности и непредсказуемости сочетания используемых материалов и их свойств	Содержание компромисса состоит в: — ранжировании целей; — назначении весовых коэффициентов — математическая модель; — физическая модель; — на основе теории подобия и т. п. Любому j -му звену трибосопряжения назначается весовой индекс $a(j)$, величина которого зависит от физико-механических и физико-химических пара- метров конструкционных материалов, определяю- щих технологические, стоимостные, надежностные и другие показатели j -го звена. Структура целевой функции Z в этом случае примет вид $Z = \sum_{(j)} a(j)$

Таблица 2
(Окончание)

2	Выбор стратегии исследования	Решение задач: 1) обеспечение максимальной эффективности трибосопряжения	$f(x) \rightarrow \max$, где $f(x)$ — функция показателей работоспособности и надежности работы трибосопряжения
		2) обеспечение минимальных затрат	$F(x) \rightarrow \min$; где $F(x)$ — функция показателей затрат на разработку
		3) выбор компромисса	$J(x) = f(x) - F(x)$, где $J(x)$ — функция показателей эффективности
3	Выбор группы критериев при решении многокритериальных задач	1) Анализ дополнительных критериев оценки эффективности работы сопряжения	Определяются и максимальное и минимальное значения функций $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$, точки перегибов, закон изменения, допустимые интервалы
		2) Устранение неопределенности цели, выбор способа действия (вектора параметров — x), максимальное значение функций $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$	$f_1(x) \rightarrow \max$; $f_2(x) \rightarrow \max$; $f_n(x) \rightarrow \max$
4	Использование способа линейной свертки	Приведение частных критериев n к общему критерию f_i	$F(x) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot f_i(x),$ где c_i — некоторые заданные положительные числа (результат экспертизы и компромисса при назначении критериев), например, $\sum_{i=1}^n c_i = 1$ при $i = 1, \dots, n$
5	Формирование динамического критерия качества применительно к силовой цепи судовой двигательной установки (СДУ) с учетом трибосопряжений с деталями из КПМ	Отыскание структуры и параметров n -мерной динамической модели силовой цепи СДУ	$K_{R,v} = [\xi(\Omega) - C(\Omega, P)] \leq \delta$; $C(\Omega, P) \in G$; $P \in G_p$; $\Omega \in R$, где $K_{R,v}$ — m -мерный векторный критерий близости вектор функции $\xi(\Omega)$ и $C(\Omega, P)$; m — характеристика технически реализуемой динамической системы; P — вектор варьируемых параметров синтезируемой системы; δ — допустимая точность моделирования (установленный нормативный вектор близости функций $\xi(\Omega)$ и $C(\Omega, P)$); G — класс, уровень вектор-функции, удовлетворяющий условиям физической реализации процесса; G_p — допустимая область в пространстве варьируемых параметров
6	Формирование целевой функции	Анализ структуры, выбор звеньев и степени сложности силовой цепи СДУ	Обеспечивается минимум целевой функции при ограничениях: число Z динамических звеньев синтезируемой силовой цепи является минимально возможным $K_{R,v}[\xi(\Omega) - C(\Omega, P)] \leq \delta$; $C(\Omega, P) \in G$; $P \in G_p$; $Z = \min$

На практике при моделировании трибосопряжений и решении задач динамического синтеза все проблемы оптимальности сводятся к решению задачи скаляризации вектора эффективности, т. е. вектора $K_{R,v}$. Причем проектировщику приходится выбирать некую схему компромисса, удовлетворяющую основным заданным критериям всех входящих компонент вектора эффективности [4], [8].

Задачу пассивного управления трибосопряжениями с КПМ можно также решать приближенно, с некоторой степенью достоверности результата, используя только динамические модели

процесса трения [4], [6], [8], используя в отдельных случаях не оптимальные критерии, а критерии, удаленные на некоторое расстояние от оптимального. Причем погрешность может вполне удовлетворять инженерному расчету. Тогда используют *квазиоптимальные* модели, а системы трения — как *рациональные* для данного конкретного инженерного решения. Одним из наиболее перспективных подходов решения задач управления трибосопряжениями, содержащими элементы КПМ, является метод *программной модификации*, разработанный в [6], [7].

Заключение

Применительно к сложным трибосистемам, содержащим в своем составе КПМ, метод квазиоптимального моделирования может заключаться в рассмотрении совокупности критериев (параметров или показателей), определяющих наилучшее состояние трибосистемы (например, максимальной надежности или эффективности пары трения, содержащей КПМ). При более детальном рассмотрении критериев производится количественная оценка основных статических и динамических свойств системы с учетом возможной локальной модификации отдельных характеристик или обобщенного параметра качества состояния поверхностного слоя деталей, выполненных из КПМ в целом [6], [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий Е. Н. Обеспечение заданной точности и качества поверхности на операциях сверления антифрикционных углепластиков на основе результатов моделирования процесса резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Е. Н. Белецкий. — Саратов: СГТУ, 2010. — 134 с.
2. Белецкий Е. Н. Изменение физико-механических показателей композиционного углепластика разной структуры при его разрушении резанием / Е. Н. Белецкий, С. Н. Безпальчук, О. А. Иванов, В. М. Петров // Инструмент и технологии. — 2007. — № 26–27. — С. 87–91.
3. Белецкий Е. Н. Учет физико-механических характеристик композиционных углепластиков, влияющих на процессы разрушения при реализации технологического процесса механической обработки и экстремальных условий эксплуатации / Е. Н. Белецкий, В. М. Петров, С. Н. Безпальчук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 66–73.
4. Денисов А. А. Теория больших систем управления / А. А. Денисов, Д. Н. Колесников. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 288 с.
5. Брайсон А. Прикладная теория оптимального управления: пер. с англ. / А. Брайсон, Ю-ши Хо. — М.: Мир, 1972. — 544 с.
6. Петров В. М. Управление процессами контактного взаимодействия элементов трибосопряжения машин и технологических систем путем применения активных сред: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / В. М. Петров. — СПб.: ПИМАШ, 2004. — 335 с.
7. Васильков Д. В. Теория и практика оптимизационного проектирования механической обработки маложестких заготовок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Д. В. Васильков. — СПб.: ГТУ, 1997. — 426 с.
8. Борисов В. И. Проблемы векторной оптимизации. В кн.: Исследование операций. Методологические аспекты / отв. ред.: А. А. Ляпунов. — М.: Наука, 1972. — С. 72–91.
9. Петров В. М. Оценка параметров шероховатости и микротвердости поверхностного слоя образцов после триботехнических испытаний с разными модификаторами трения / В. М. Петров, В. М. Федосов, С. Г. Чулкин [и др.] / Международная научно-практическая конференция: «Качество поверхностного слоя деталей машин», 24 – 26 июня, 2003. — СПб.: ПИМАШ, 2003. — С. 130–137.
10. Вейц В. Л. Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания / В. Л. Вейц, А. Е. Кочура. — Л.: Машиностроение, 1976. — 384 с.

DIFFERENT LEVELS OF MODELING OF COMPLEX STRUCTURES MARINE POWER PLANTS, THE INDIVIDUAL ELEMENTS OF WHICH MADE OF COMPOSITE POLYMER MATERIALS

The article describes a new multilevel approach to the modeling of friction units ship dvigatel'no complex, separate elements of which are made from composite polymeric materials. Tribosystem in the modeling process is seen as complex, depending on a variety of criteria.

Presents various options for the management of complex tribosystems containing the elements of the composite materials. In particular, active management by providing extra energy, and passive due to the differential feedback system to external stimuli and changes in feedbacks.

A new integrated approach in modeling, which involves solving the optimization problem and the choice of the vector criterion of the performance of the system.

The obtained new dependences for dynamic quality criteria tribosystem or complex objective functions based on the method of linear convolution.

Keywords: composite materials, modeling of friction units, machining, boundary conditions, optimization criteria, the state vector, parameters of quality.

REFERENCES

1. Beleckij, E. N. Obespechenie zadannoj tochnosti i kachestva poverhnosti na operacijah sverlenija antifrikcionnyh ugleplastikov na osnove rezultatov modelirovanija processa rezanija: abstract of PhD diss. (Tech.). Saratov: SGTU, 2010.

2. Beleckij, E. N., S. N. Bezpal'chuk, O. A. Ivanov, and V. M. Petrov. "Izmenenie fiziko-mehaničeskikh pokazatelej kompozicionnogo ugleplastika raznoj struktury pri ego razrušenii rezaniem." *Instrument i tehnologii* 26–27 (2007): 87–91.

3. Beleckij, E. N., V. M. Petrov, and S. N. Bezpalchuk. "The physical-mechanical characteristics of composite plastics influence on the processes of destruction at realization of technological process of machining and extreme conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 66–73.

4. Denisov, A. A., and D. N. Kolesnikov. *Teorija bolshih sistem upravlenija* / A. A. Denisov, — L.: Jenergoizdat, 1982.

5. Brajson, A., and Ju-shi Ho. *Prikladnaja teorija optimalnogo upravlenija*. M.: Mir, 1972.

6. Petrov, V. M. Upravlenie processami kontaktnogo vzaimodejstvija jelementov tribosopnja-zhenija mashin i tehnologičeskikh sistem putem primenenija aktivnyh sred: Dr. diss. (Tech.). SPb.: PIMASH, 2004.

7. Vasilkov, D. V. *Teorija i praktika optimizacionnogo proektirovanija mehaničeskoj obrabotki malozhestkih zagotovok*: Dr. diss. (Tech.). SPb.: GTU, 1997.

8. Borisov, V. I. "Problemy vektornoj optimizacii." *Issledovanie operacij: metodologičeskie aspekty*. M.: Nauka, 1972. 72–91.

9. Petrov, V. M., V. M. Fedosov, S. G. Chulkin, et al. "Ocenka parametrov sherohovatosti i mikrotverdosti poverhnostnogo sloja obrazcov posle tribotehničeskikh ispytanijs raznymi modifikatorami trenija." *Mezhdunarodnaja nauchno-praktičeskaja konferencija: "Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej mashin", 24-26 ijunya, 2003*. SPb.: PIMASH, 2003: 130–137.

10. Vejc, V. L., and A. E. Kochura. *Dinamika mashinnyh agregatov s dvigateljami vnutrennego sgoranija*. L.: Mashinostroenie, 1976.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Белецкий Евгений Николаевич —
кандидат технических наук, главный технолог.
ОАО «Концерн «НПО» Аврора»
famalien@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Beleckij Evgenij Nikolaevich —
PhD, chief technologist.
Concern Avrora Scientific and Production Association JSC
famalien@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2015 г.

ВЛИЯНИЕ ИЗНОСОВ ДЕЙДВУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ГРЕБНОГО ВАЛА

Исследуется влияние износов дейдвудных подшипников в процессе эксплуатации судов и переменного гидродинамического момента на устойчивость вращения гребного вала. Рассматривается нагружение кормового участка гребного вала, как имеющего минимальную собственную частоту. Расчетная схема гребного вала принимается в виде стержня постоянного сечения, опирающегося на три шарнирные опоры, с консолью с одного конца. Опоры, моделирующие дейдвудные подшипники, одностороннего действия (подшипники скольжения) и смещаемые за счет их износа. Стержень нагружен собственным весом вала и гребного винта, а также переменным гидродинамическим моментом. При исследовании поперечных колебаний гребного вала учитывается масса и диаметральный момент инерции массы винта.

Проведенное в работе исследование показало, что гидродинамический момент и износы дейдвудных подшипников могут существенно влиять на устойчивость работы валопровода в процессе эксплуатации судна. При этом оказывают влияние не только величины износов подшипников, но и соотношение между ними. Поэтому гидродинамический момент и прогнозируемые износы подшипников необходимо обязательно учитывать при монтаже валопровода, а исследования по динамической устойчивости вращения вала должны быть продолжены!

Ключевые слова: устойчивость вращения вала, поперечные колебания, износ подшипников, гидродинамический момент.

Введение

Обеспечению надежной работы валопровода уделяется особое внимание. Однако, несмотря на многочисленные исследования, которые в основном носят статический характер [1] – [3], и достигнутые при этом успехи, по-прежнему, в практике эксплуатации валопроводов судов имеют место случаи нарушения устойчивого вращения вала. В результате судно выводится из эксплуатации, требуется ремонт и т. д. Все это приводит к дополнительным расходам, часто весьма значительным. В работе [4] установлено, что одной из возможных причин нарушения устойчивого вращения вала может являться износ дейдвудных подшипников и изменение при этом поперечных колебаний вала в процессе эксплуатации судна.

Основная часть

Причинами, приводящими к изменению поперечных колебаний валопровода и, как следствие, к неустойчивой работе валопровода, помимо износа дейдвудных подшипников, могут быть следующие:

- изменение укладки гребного вала вследствие естественного (от эксплуатации) износа длинных дейдвудных подшипников;
- возникновение так называемых *параметрических колебаний* в системе валопровода, согласно исследованиям [5] – [7], которые происходят по другим законам, чем обычные (механические) колебания;
- периодический отрыв вала от подшипника вследствие сложения реакций от весовых нагрузок на вал (статические нагрузки) и реакций от колебаний вала, как установлено в работе [8].

Проведенные исследования [9] показали, что причиной отрыва вала от подшипника может явиться износ подшипника. Однако недостатком работ [8] – [9] является то, что они учитывают только кормовой участок гребного вала и не учитывают влияние на колебания соседних пролетов.

Поэтому с целью уточнения полученных в этих работах результатов рассмотрим более точную расчетную схему гребного вала. Примем расчетную схему, включающую не только дейдвудные подшипники, но и выносной — рис. 1.

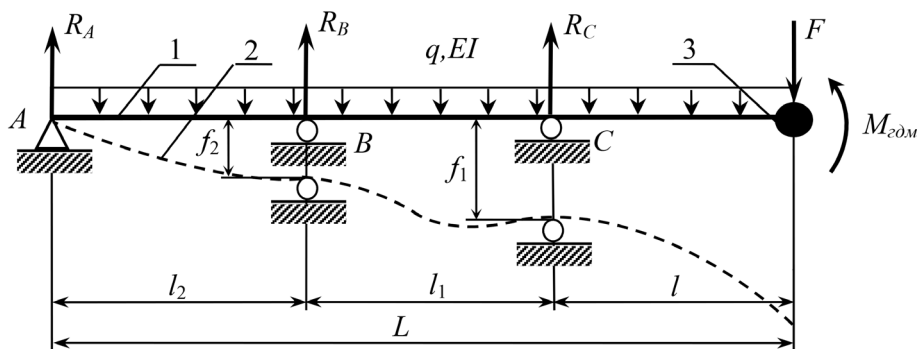


Рис. 1. Расчетная схема гребного вала:

1 — вал до износа подшипников; 2 — вал после износа подшипников (пунктирная линия); 3 — гребной винт;
 f_1, f_2 — величина износа подшипников; МГДМ — переменный гидродинамический момент;
 F — вес винта; q — интенсивность погонной нагрузки на гребной вал; EI — жесткость сечений вала на изгиб;
 l, L — длины участков вала

Математическое решение задачи

Согласно теории малых механических колебаний, колебания упругой системы происходят относительно ее статического равновесия. Поэтому статическое нагружение вала и его поперечные колебания можно рассматривать независимо друг от друга (рис. 2).

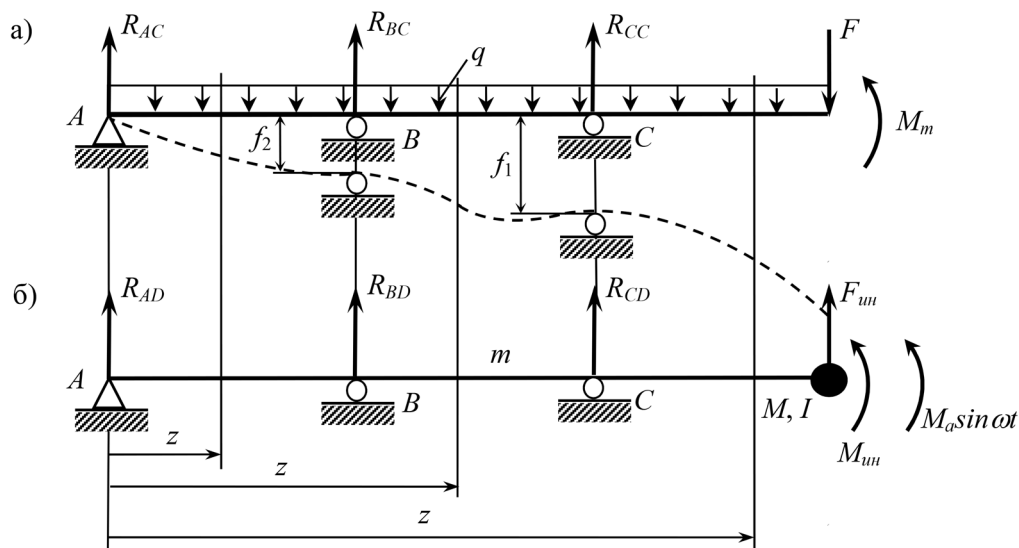


Рис. 2. Расчетные схемы гребного вала:

а — при действии постоянных нагрузок;

б — при действии переменной составляющей гидродинамического момента;

m, M — соответственно погонная масса гребного вала и гребного винта (определяется по справочнику);
 I — момент инерции винта; $F_{ин}, M_{ин}$ — соответственно сила и изгибающий момент инерции от массы винта

Таким образом, реакции опор от статического и динамического нагружения будут равны:

$$\left. \begin{aligned} R_A &= R_{AC} + R_{AD}; \\ R_B &= R_{BC} + R_{BD}; \\ R_C &= R_{CC} + R_{CD}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Статическое нагружение (рис. 2, а).

Гидродинамический момент $M_{ГДМ}$ имеет постоянную M_m и переменную $M_a \sin \omega t$, составляющие, т. е. $M_{ГДМ} = M_m + M_a \sin \omega t$. Постоянную составляющую M_m относим к статическим нагрузкам, $M_a \sin \omega t$ — к динамическим.

Дифференциальное уравнение изгиба вала имеет вид

$$EI \frac{d^4 y_2}{dz^4} = q(z). \quad (2)$$

Его интегрирование выполняем по методу начальных параметров Коши. Начало координат принимаем на опоре А. Тогда

– при $0 \leq z \leq l_2$

$$y = y_0 + \varphi_0 z + \frac{M_0 z^2}{2EI} + \frac{Q_0 z^3}{6EI} - \frac{qz^4}{24EI}; \quad (3)$$

– при $l_2 \leq z \leq (l_2 + l_1)$

$$y = y_0 + \varphi_0 z + \frac{M_0 z^2}{2EI} + \frac{Q_0 z^3}{6EI} - \frac{qz^4}{24EI} + \frac{R_{BC}(z - l_2)^3}{6EI}; \quad (4)$$

– при $(l_2 + l_1) \leq z \leq L$

$$y = y_0 + \varphi_0 z + \frac{M_0 z^2}{2EI} + \frac{Q_0 z^3}{6EI} - \frac{qz^4}{24EI} + \frac{R_{BC}(z - l_2)^3}{6EI} + \frac{R_{CC}(z - (l_2 + l_1))^3}{6EI}, \quad (5)$$

где y_0 , φ_0 , M_0 и Q_0 — так называемые *начальные параметры*, соответственно прогиб и угол поворота сечения, изгибающий момент и поперечная сила в сечении в начале координат, т. е. при $z = 0$.

Так как в сечении А стоит шарнирно-неподвижная опора, $y_0 = 0$ и $M_0 = 0$, $Q_0 = R_{AC}$.

В результате выражения (3) – (5) принимают вид:

– при $0 \leq z \leq l_2$

$$y = \varphi_0 z + \frac{R_{AC} z^3}{6EI} - \frac{qz^4}{24EI}; \quad (6)$$

– при $l_2 \leq z \leq (l_2 + l_1)$

$$y = \varphi_0 z + \frac{R_{AC} z^3}{6EI} - \frac{qz^4}{24EI} + \frac{R_{BC}(z - l_2)^3}{6EI}; \quad (7)$$

– при $(l_2 + l_1) \leq z \leq L$

$$y = \varphi_0 z + \frac{R_{AC} z^3}{6EI} - \frac{qz^4}{24EI} + \frac{R_{BC}(z - l_2)^3}{6EI} + \frac{R_{CC}(z - (l_2 + l_1))^3}{6EI}. \quad (8)$$

Неизвестные угол поворота в начале координат φ_0 и реакции опор R_{AC} , R_{BC} и R_{CC} находим из следующих граничных условий:

$$\left. \begin{array}{ll} 1. z = l_2 & y = -f_2 \\ 2. z = (l_2 + l_1) & y = -f_1 \\ 3. z = L & M_x = M_m; \quad Q_y = F \end{array} \right\} \quad (9)$$

Учитывая, что $M_x = EI \frac{d^2 y}{dz^2}$ и $Q_y = EI \frac{d^3 y}{dz^3}$ и выражения (6) – (8) — граничные условия (9), приводят к системе следующие четыре уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_0 l_2 + \frac{R_{AC} l_2^3}{6EI} - \frac{q l_2^4}{24EI} = -f_2; \\ \varphi_0 (l_2 + l_1) + \frac{R_{AC} (l_2 + l_1)^3}{6EI} - \frac{q (l_2 + l_1)^4}{24EI} + \frac{R_{BC} l_1^3}{6EI} = -f_1; \\ R_{AC} L - \frac{q L^4}{24EI} + R_{BC} (L - l_2) + R_{CC} l = M_m; \\ R_{AC} - q L + R_{BC} + R_{CC} = F. \end{array} \right. \quad (10)$$

Исключив начальный угол поворота φ_0 , получим систему уравнений для вычисления статических реакций R_{AC} , R_{BC} и R_{CC} :

$$\begin{cases} \alpha_1(1 + \alpha_1)(2 + \alpha_1)R_{AC} + \alpha_1^3 R_{BC} = \\ = \alpha_2((1 + \alpha_1)f_2 - f_1) + \frac{1}{4}(1 + \alpha_1)((1 + \alpha_1)^3 - 1)ql_2; \\ R_{AC}L + R_{BC}(L - l_2) + R_{CC}l = M_m + \frac{1}{2}qL^2; \\ R_{AC} + R_{BC} + R_{CC} = F + qL, \end{cases} \quad (11)$$

где введены следующие обозначения:

$$\alpha_1 = \frac{l_1}{l_2}; \quad \alpha_2 = \frac{6EI}{l_2^3}.$$

Динамическое нагружение (рис. 2, б).

Дифференциальное уравнение поперечных колебаний вала имеет выражение

$$EI \frac{\partial^4 y_1}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} = 0. \quad (12)$$

Решаем его по методу Фурье.

Принимаем

$$y = y(z) \sin \omega t. \quad (13)$$

Подставляем выражение (13) в уравнение (12).

После сокращения на $\sin \omega t$ для формы колебаний получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} - \frac{m\omega^2}{EI} y = 0. \quad (14)$$

Интегрируя его по методу начальных параметров, находим:

– при $0 \leq z \leq l_2$

$$y = y_0 K_1(\alpha z) + \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha z) + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} K_3(\alpha z) + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha z), \quad (15)$$

– при $l_2 \leq z \leq (l_1 + l_2)$

$$\begin{aligned} y = y_0 K_1(\alpha z) + \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha z) + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} K_3(\alpha z) + \\ + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha z) + \frac{R_{BD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha(z - l_2)), \end{aligned} \quad (16)$$

– при $(l_1 + l_2) \leq z \leq L$

$$\begin{aligned} y = y_0 K_1(\alpha z) + \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha z) + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} K_3(\alpha z) + \\ + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha z) + \frac{R_{BD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha(z - l_2)) + \frac{R_{CD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha(z - (l_2 + l_1))), \end{aligned} \quad (17)$$

где y_0 , φ_0 , M_0 , Q_0 — начальные параметры, определяемые из граничных условий; K_1 , K_2 , K_3 , K_4 — система фундаментальных функций с единичной матрицей аргументов (αz) , $(\alpha(z - l_2))$ и $(\alpha(z - (l_2 + l_1)))$.

$$\alpha^4 = \frac{m\omega^2}{EI}. \quad (18)$$

Граничные условия:

$$1. \text{ Так как опора } A \text{ — шарнирно-неподвижная, } y_0 = 0; M_0 = 0; Q_0 = R_{AD}. \quad (19)$$

$$2. z = l_2 \quad y = 0 \quad (20)$$

$$3. z = (l_2 + l_1) \quad y = 0 \quad (21)$$

$$4. \text{ На правом конце балки } (z = L) \quad Q_y = -F_{\text{ин}}; \quad M_x = M_{\text{ин}} + M_a \sin \omega t, \quad (22)$$

где Q_y и M_x — соответственно поперечная сила и изгибающий момент в сечении вала;

$F_{\text{ин}}$ и $M_{\text{ин}}$ — сила инерции и изгибающий момент от момента инерции I массы гребного винта (см. рис. 2, б), т. е.

$$F_{\text{ин}} = -M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2};$$

$$M_{\text{ин}} = -I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -I \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right).$$

Так как $M_x = EI \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}$; $Q_y = EI \frac{\partial^3 y}{\partial z^3}$, граничные условия (22) принимают вид:

$$EI \frac{\partial^3 y}{\partial z^3} = M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (23)$$

$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = -I \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right) + M_a \sin \omega t. \quad (24)$$

Учитывая условия (19), имеем следующие выражения для формы колебаний (15) – (17):

– при $0 \leq z \leq l_2$

$$y = \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha z) + \frac{R_{AD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha z), \quad (25)$$

– при $l_2 \leq z \leq (l_1 + l_2)$

$$y = \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha z) + \frac{R_{AD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha z) + \frac{R_{BD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha(z - l_2)), \quad (26)$$

– при $(l_1 + l_2) \leq z \leq L$

$$y = \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha z) + \frac{R_{AD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha z) + \frac{R_{BD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha(z - l_2)) + \frac{R_{CD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha(z - (l_1 + l_2))). \quad (27)$$

В результате граничные условия (20), (21), (23) и (24) после преобразований получим в виде следующих выражений:

$$\frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha l_2) + \frac{R_{AD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha l_2) = 0;$$

$$\frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha(l_2 + l_1)) + \frac{R_{AD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha(l_2 + l_1)) + \frac{R_{BD}}{\alpha^3 EI} K_4(\alpha l_1) = 0;$$

$$EI\alpha^2(K_3(\beta) + \gamma_1\beta K_2(\beta))\varphi_0 + (K_1(\beta) + \gamma_1\beta K_4(\beta))R_{AD} + \\ + (K_1(\alpha(l_1 + l)) + \gamma_1\beta K_4(\alpha(l_1 + l)))R_{BD} + (K_1(\alpha l) + \gamma_1\beta K_4(\alpha l))R_{CD} = 0;$$

$$EI\alpha(K_4(\beta) - \gamma_2\beta^3 K_1(\beta))\varphi_0 + \frac{1}{\alpha}(K_2(\beta) - \gamma_2\beta^3 K_3(\beta))R_{AD} + \\ + \frac{1}{\alpha}(K_2(\alpha(l_1 + l)) - \gamma_2\beta^3 K_3(\alpha(l_1 + l)))R_{BD} + \frac{1}{\alpha}(K_2(\alpha l) - \gamma_2\beta^3 K_3(\alpha l))R_{CD} = M_a,$$

где

$$\beta = \alpha L; \quad \gamma_1 = \frac{M}{mL}; \quad \gamma_2 = \frac{I}{mL^3}. \quad (28)$$

Исключив из этих выражений φ_0 , для определения динамических составляющих реакций опор R_{AD} , R_{BD} и R_{CD} окончательно получим следующую систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} A_{11}R_{AD} + A_{12}R_{BD} = 0; \\ A_{21}R_{AD} + A_{22}R_{BD} + A_{23}R_{CD} = 0; \\ A_{31}R_{AD} + A_{32}R_{BD} + A_{33}R_{CD} = M_a. \end{cases} \quad (29)$$

Коэффициенты A_{ij} ($i = 1 - 3, j = 1 - 3$) имеют значения:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \left[K_4((1-n)\beta) - \frac{K_4(n_2\beta)}{K_2(n_2\beta)} K_2((1-n)\beta) \right]; \quad A_{12} = K_4(n_1\beta); \quad A_{13} = 0; \\ A_{21} &= \left[K_1(\beta) + \gamma_1\beta K_4(\beta) - (K_3(\beta) + \gamma_1\beta K_2(\beta)) \frac{K_4(n_2\beta)}{K_2(n_2\beta)} \right]; \\ A_{22} &= [K_1((1-n)\beta) + \gamma_1\beta K_4((1-n_2)\beta)]; \quad A_{23} = [K_1(n\beta) + \gamma_1\beta K_4(n\beta)]; \\ A_{31} &= \frac{L}{\beta} \left[K_2(\beta) - \gamma_2\beta^3 K_3(\beta) - (K_4(\beta) - \gamma_2\beta^3 K_1(\beta)) \frac{K_4(n_2\beta)}{K_2(n_2\beta)} \right]; \\ A_{32} &= \frac{L}{\beta} [K_2((1-n_2)\beta) - \gamma_2\beta^3 K_3((1-n_2)\beta)]; \quad A_{33} = \frac{L}{\beta} [K_2(n\beta) - \gamma_2\beta^3 K_3(n\beta)], \end{aligned}$$

где $n = \frac{l}{L}; \quad n_1 = \frac{l_1}{L}; \quad n_2 = \frac{l_2}{L}.$

Используя систему уравнений (29), можно решать две следующие задачи:

1. *Определение собственной частоты гребного вала, если известны его параметры.*
2. *Определение динамических составляющих реакций R_{AD} , R_{BD} и R_{CD} при заданной скорости вращения вала ω .*

Численный эксперимент

Оценку влияния износов подшипников f_1 и f_2 и поперечных колебаний вала на величину параметров «центровки» валопровода произведем, используя численные эксперименты.

Рассмотрим гребной вал с параметрами:

$L = 8,6$ м; $l = 1,725$ м; $l_1 = 4,385$ м; $l_2 = 2,49$ м; $F = 73,85$ кН; $q = 11,05$ кН/м; $EI = 8,064 \cdot 10^5$ кНм²; лопастная частота $\omega = 60,81$ 1/с; $M_{гдм}^{\max} = -138,2$ кН·м; $M_{гдм}^{\min} = -37,69$ кН·м; $M_m = -87,94$ кН·м; $M_a = 50,26$ кН·м.

Момент инерции гребного винта вычисляем по формуле [9]:

$$I = 0,02MD^2 \frac{A}{A_D} \left(\frac{A}{A_D} + 3 \right) \text{ кг·м}^2.$$

Рассмотрим валопровод, у которого диаметр гребного винта $D = 3,70$ м, дисковое отношение гребного винта $\frac{A}{A_D} = 0,57$.

Массу увлекаемой винтом воды $M_{ув}$ вычисляем по формуле

$$M_{ув} = 0,28 \cdot 10^3 D^3 \frac{\left(\frac{A}{A_D} - 0,06z \right)}{\sqrt{(1 + H/D)^3}},$$

где z — число лопастей гребного винта ($z = 4$);

H/D — шаговое отношение винта, $H/D = 1,10$.

Тогда

$$M_{yb} = 0,28 \cdot 10^3 3,7^3 \cdot \frac{(0,57 - 0,06 \cdot 4)}{\sqrt{(1+1,1)^3}} = 1538 \text{ кг.}$$

Масса гребного винта с учетом присоединенной массы воды $M_{об}$:

$$M_{об} = M + M_{yb} \frac{1}{g} (73,85 + 15,38) = 89,23 \frac{\text{кН}}{g}.$$

Момент инерции гребного винта I :

$$I = 0,02 \frac{73,85}{g} \cdot 3,7^2 \cdot 0,57 \cdot (0,57 + 3) = 41,15 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}^2}{g}.$$

Определим собственную частоту рассматриваемого гребного вала. Сначала из условия (30) находим $\beta \approx 2,98$. Затем, используя выражение (31), вычисляем $\omega_0 = 101,6 \text{ 1/с} \approx 102 \text{ с}^{-1}$. «Отстройка» вала $\Delta\omega$ от лопастной частоты ω составляет

$$\Delta\omega = \left| 1 - \frac{\omega_0}{\omega} \right| = \left| 1 - \frac{102}{60,8} \right| = 0,678 > 0,2.$$

Таким образом, условие «отстройки» вала от резонанса выполняется с достаточным запасом.

Динамические составляющие реакций R_{AD} , R_{BD} , R_{CD} в кН вычисляем, используя систему уравнений (29):

$$R_{AD} = -0,185 \frac{1}{M} M_a \sin \omega t = -0,185 \cdot 50,26 \sin \omega t = -9,30 \sin \omega t;$$

$$R_{BD} = 0,615 \frac{1}{M} M_a \sin \omega t = 0,615 \cdot 50,26 \sin \omega t = 30,91 \sin \omega t;$$

$$R_{CD} = -0,612 \frac{1}{M} M_a \sin \omega t = -0,612 \cdot 50,26 \sin \omega t = -30,76 \sin \omega t.$$

Составляющие реакций от статических нагрузок определяем из системы уравнений (11). С целью дальнейшего анализа влияния различных нагрузок на реакции подшипников представим реакции, используя принцип независимости действия сил, как суммы величин от каждого вида нагрузки: весовых нагрузок F и q на вал; износов дейдвудных подшипников f_1 и f_2 и постоянной составляющей M_m гидродинамического момента.

Тогда

$$R_{AC} = 24,13 \text{ кН} + 32,23(2,761f_2 - f_1) \frac{\text{кН}}{\text{мм}} + 11,26 \text{ кН};$$

$$R_{BC} = -11,09 \text{ кН} - 50,53(2,761f_2 - f_1) \frac{\text{кН}}{\text{мм}} - 37,73 \text{ кН};$$

$$R_{CC} = 155,9 \text{ кН} + 18,30(2,761f_2 - f_1) \frac{\text{кН}}{\text{мм}} + 26,47 \text{ кН}.$$

Таким образом, экстремальные значения реакций опор от совместного действия статических и динамических нагрузок имеют значения:

$$R_A = 24,13 \text{ кН} + 32,23(2,761f_2 - f_1) \frac{\text{кН}}{\text{мм}} + 11,26 \text{ кН} \pm 9,30 \text{ кН};$$

$$R_B = -11,09 \text{ кН} - 50,53(2,761f_2 - f_1) \frac{\text{кН}}{\text{мм}} - 37,73 \text{ кН} \pm 30,91 \text{ кН};$$

$$R_C = 155,9 \text{ кН} + 18,30(2,761f_2 - f_1) \frac{\text{кН}}{\text{мм}} + 26,47 \text{ кН} \pm 30,76 \text{ кН}.$$

Для устойчивого вращения вала на всех режимах эксплуатации судна должен быть обеспечен гарантированный контакт вала с подшипниками, т. е. реакции опор должны быть положительными [10]. Учитывая данное требование и анализируя выражения для вычисления реакций,

видно, что в отличие от реакций R_A и R_C , реакция опоры В имеет критическое значение, так как ее знак зависит не только от весовых нагрузок на вал, но весьма существенно — от износов подшипников и величины гидродинамического момента. Поэтому, если при центровке вала не обеспечить достаточный запас значения реакции на носовом дейдвудном подшипнике, то при определенных значениях гидродинамического момента вал «оторвется» от подшипника или, что еще хуже, начнет периодически стучать по подшипнику.

Выводы

1. Гидродинамический момент и износ дейдвудных подшипников могут существенно влиять на устойчивость работы валопровода в процессе эксплуатации судна.
2. При этом оказывает влияние не только величина износов подшипников, но и соотношение между ними.
3. Гидродинамический момент и прогнозируемые износы подшипников необходимо обязательно учитывать при монтаже валопровода.
4. Учитывая сложность и актуальность решаемой задачи для практики эксплуатации судов, исследования по данному направлению следует продолжить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozousek V. M. Analysis and Survey Procedures of Propulsion Systems: Shaft Alignment / V.M. Kozousek, P.G. Davies // Lloyd's Register's Technical Association, Paper. — 2000. — Vol. 5.
2. Румб В. К. Прогнозирование долговечности дейдвудных подшипников / В.К. Румб // Морской вестник. — 2008. — № 2. — С. 30–31.
3. Комаров В. В. Центровка судовых валопроводов и главных двигателей: монография / В. В. Комаров. — Астрахань: Изд-во АГТУ, 2011. — 458с.
4. Миронов А. И. Исследование влияния изнашивания дейдвудных подшипников на колебания гребного вала / А. И. Миронов // Труды 1-го Международного симпозиума по транспортной триботехнике «Транс-трибо-2001», С-Петербург, 2–7 июля 2001. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. — 66 с.
5. Мамонтов В. А. Расчет поперечных колебаний валопроводов судов с учетом длины и жесткости дейдвудных подшипников / В. А. Мамонтов, А. Р. Рубан, Н. В. Куличкин, А. А. Халявкин // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2010. — № 2. — С. 30–33.
6. Миронов А. И. Влияние дейдвудных подшипников на колебания валопроводов судов / А. И. Миронов, Л. М. Денисова // Вестник АГТУ. — 2004. — № 1. — С. 125–130.
7. Мамонтов В. А. Исследование параметрических колебаний валопроводов судов / В. А. Мамонтов, А. И. Миронов, А. А. Халявкин // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2011. — №4 (5). — С. 2333–2334.
8. Миронов А. И. Влияние колебаний вала на параметры «центровки» валопровода / А. И. Миронов, Е. В. Пономарева // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 2. — С. 86–94.
9. Миронов А. И. Об одной из возможных причин динамической неустойчивости валопроводов судов / А. И. Миронов, А. Ю. Кукарина // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 64–71.
10. Халявкин А. А. Разработка методики определения допускаемых износов дейдвудных капролоновых подшипников на основе расчетов поперечных колебаний валопроводов судов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Халявкин. — Астрахань, 2014. — 16 с.

THE EFFECT OF WEAR OF STERN BEARINGS AND HYDRODYNAMIC MOMENTS ON STABILITY OF ROTATION OF THE PROPELLER SHAFT

The studying of the effect wears stern tube bearings in ship operation and variable hydrodynamic moment on the stability of rotation of the propeller shaft.

Considered the loading of the feed section of the propeller shaft as having a minimum natural frequency. The settlement scheme of the propeller shaft is received in the form of a rod of constant cross section, it is based

on three articulated supports with the console at one end. Supports are modeling the stern tube bearings, single (bearings) and biased due to their wear. The rod is loaded with its own weight of the shaft and propeller and variable hydrodynamic moment. In the study of transverse vibrations of the propeller shaft is taken into account mass and diameter mass moment of inertia of the screw.

The investigations showed that the hydrodynamic moment and wear stern tube bearings can significantly affect the stability of the shaft line during operation of the ship. Thus not only affect the amount of wear of bearings, and the ratio between them.

Therefore, the hydrodynamic moment and predicted bearing wear must be always taken into account when installing the shafting, and research on the dynamic stability of the shaft rotation to be continued!

Keywords: a stability of the rotation, the transverse vibrations, a wear of bearings, a hydrodynamic moment.

REFERENCES

1. Kozousek, V. M., and P. Davies. "Analysis and Survey Procedures of Propulsion Systems: Shaft Alignment." *Lloyd's Register's Technical Association, Paper 5* (2000).
2. Rumb, Victor Karlovich. "Forecasting of stern tube bearings' durability." *Morskoy Vestnik* 2 (2008): 30–31.
3. Komarov, V. V. *Centrovka sudovyh valoprovodov i glavnynh dvigatelej: monografiya*. Astrahan: Izd-vo AGTU, 2011.
4. Mironov, Alfred Ivanovich. "Issledovanie vliyanija iznashivaniya dejdvudnyh podshpnikov na kolebanija grebnogo vala." *Trudy I Symposiuma po transp. Tribotechnike "Transtribo-2001"*. SPb.: Izd. SPbGTU, 2001.
5. Mamontov, Viktor Andreevich, A. R. Ruban, N. V. Kulichkin, and A. A. Khalyavkin. "Calculation of transverse vibrations of ship shafts taking into account the length and rigidity of stern-tube bearings." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2010): 30–33.
6. Mironov, Alfred Ivanovich, and L. M. Denisova. "Vliyanie dejdvudnyh podshipnikov na kolebanija valoprovodov sudov." *Vestnik of Astrakhan State Technical University* 1 (2004): 125–130.
7. Mamontov, Viktor Andreevich, A. I. Mironov, and A. A. Khalyavkin. "Investigating the parametrical fluctuations of shaft lines of ships." *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod* 4(5) (2011): 2333–2334.
8. Mironov, Alfred Ivanovich, and E. V. Ponomareva. "Impact of shaft fluctuations on the parameters of shafting "alignment"." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2014): 86–94.
9. Mironov, Alfred Ivanovich, and A. Yu. Kukarina "On one of the possible causes of dynamic instability of ship shafting." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 64–71.
10. Khalyavkin, A. A. *Razrabotka metodiki opredeleniya dopuskaemyh iznosov dejdvudnyh kaprolonovyh podshipnikov na osnove raschetov poperechnykh kolebanij valoprovodov su-dov: abstract of PhD diss. (Tech.)*. Astrahan, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кукарина Алла Юрьевна —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
alla.kukarina@mail.ru
Миронов Альфред Иванович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
mig@astu.org
Рубан Анатолий Рашидович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
a.ruban1974@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kukarina Alla Jur'evna —
Senior lecturer.
FSBEI HPE "ASTU"
alla.kukarina@mail.ru
Mironov Alfred Ivanovich —
PhD, associate professor.
FSBEI HPE "ASTU"
mig@astu.org
Ruban Anatolij Rashidovich —
PhD, associate professor.
FSBEI HPE "ASTU"
a.ruban1974@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В СУДОВОМ ДВС ПО ИНДИКАТОРНЫМ ДИАГРАММАМ

В статье изложены термодинамические основы и методика уточненного расчета характеристик выделения теплоты при горении по экспериментальным индикаторным диаграммам, введен термин «располагаемая теплота». Предложено оценивать продолжительность сгорания по положению «квази-адиабатной точки» на характеристике располагаемой теплоты. Исследованы некоторые причины погрешностей в исходных данных для анализа индикаторных диаграмм, в частности, описаны неточности в определении цикловой подачи топлива и измерении текущего давления в цилиндре двигателя при регистрации индикаторной диаграммы. С целью учёта указанных погрешностей предложены и обоснованы способы корректировки указанных исходных данных. Утверждается, что использование на практике предложенной методики и соответствующей программы анализа индикаторных диаграмм обеспечивает требуемое качество результатов исследования влияния различных факторов на процесс горения топлива в дизеле и способствует высокому качеству его диагностирования.

Ключевые слова: рабочий процесс дизеля, выделение теплоты при горении, характеристики тепловыделения, погрешности регистрации индикаторных диаграмм, учёт погрешностей.

Введение

Развитие судовых двигателей внутреннего сгорания и эффективность их использования в значительной мере определяются возможностями получения достоверной информации о процессе горения топлива в дизелях и выполнения анализа указанного процесса. Для этого создаются диагностические системы, использующиеся на стадиях создания и технического использования двигателей [1] – [3]. Успехам в решении указанных задач способствуют достижения современной микроэлектроники и вычислительной техники. Актуальной проблемой является развитие алгоритмического обеспечения работы диагностических систем.

С учётом ранее изложенного, цель данного исследования состоит в уточнении теоретических основ исследования процесса горения в судовом дизеле по индикаторным диаграммам и разработке усовершенствованной методики расчета характеристик тепловыделения при горении.

Характеристики выделения теплоты при горении топлива в дизеле.

Уточнение понятий

Существующие и по настоящее время модернизируемые упрощенные модели рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (ДВС) обладают весьма ограниченными возможностями в части описания процесса горения топлива [4]. Известно, что важнейшим средством исследования горения в дизеле является анализ индикаторной диаграммы (ИД) на выделение теплоты (или на так называемое тепловыделение) [5]. ИД — это зависимость давления в цилиндре p , МПа, от текущего объема цилиндра V , м³ (свернутая ИД) или от угла поворота коленчатого вала φ , °п.к.в. (развернутая ИД). Фрагмент развернутой ИД приведен на рис. 1.

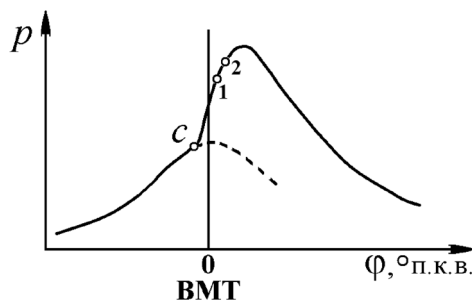


Рис. 1. Развернутая индикаторная диаграмма:

c — точка «отрыва» линии сгорания от линии сжатия; 1, 2 — текущие точки на линии сгорания

Анализируя форму ИД, можно получить информацию о процессе выделения теплоты от сгорания топлива. Характеристикой тепловыделения называют функцию количества теплоты, выделившейся в цилиндре, от угла поворота коленчатого вала $Q = f(\varphi)$ или времени $Q = f(\tau)$ (ранее были введены в употребление не вполне корректные термины «закон сгорания», «закон тепловыделения» [6]).

Характеристики тепловыделения выражают по-разному: в виде зависимости абсолютного количества теплоты Q , выделившейся к текущему углу п.к.в., — интегральной характеристики $Q = f(\varphi)$ либо в виде зависимости, так называемой скорости тепловыделения $dQ/d\varphi = f(\varphi)$ — дифференциальной характеристики. В большинстве случаев используют характеристики не абсолютного, а относительного тепловыделения, которые обычно получают делением текущих значений $Q(\varphi)$ на теплоту $Q_{\text{ц}}$, выделившуюся при сгорании цикловой дозы $g_{\text{ц}}$ поданного в цилиндр топлива (цикловой подачи):

$$x(\varphi) = Q(\varphi)/Q_{\text{ц}}$$

Заметим, что $Q_{\text{ц}} = g_{\text{ц}} Q_{\text{н}}$, где $Q_{\text{н}}$ — низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

В этом случае характеристику относительной скорости тепловыделения (интенсивности выделения теплоты при сгорании топлива) можно представить в виде $dx/d\varphi = f(\varphi)$. Указанные характеристики в упрощенном виде приведены на рис. 2.

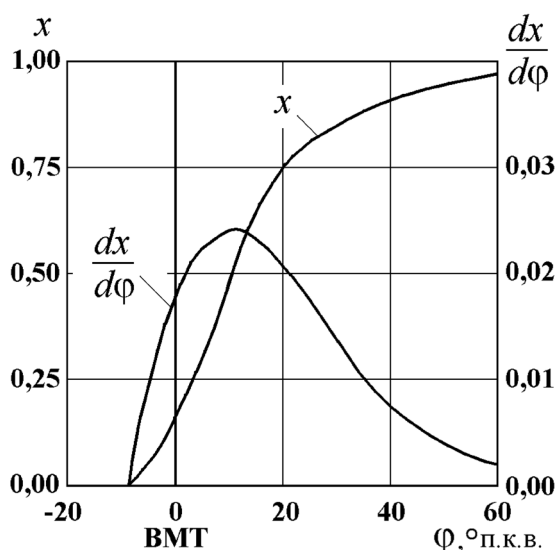


Рис. 2. Характеристики тепловыделения

При сгорании одна часть выделившейся теплоты Q_i подводится к рабочему телу и может быть использована для повышения его внутренней энергии и совершения механической работы, а другая ее часть: $Q_w = Q - Q_i$, представляет собой преимущественно потери теплоты через стенки цилиндра. Теплоту Q_i иногда называют *активной*, или *полезно используемой* [7]. Предложим, на наш взгляд, более точное её название — *располагаемая теплота*, т. е. теплота, которой можно располагать для того, чтобы некоторую её часть (желательно максимально возможную) преобразовать в полезную работу. Характеристики относительной выделившейся теплоты x , относительной располагаемой теплоты x_i и относительной теплоты потерь x_w приведены на рис. 3.

В момент окончания горения относительное количество выделившейся теплоты теоретически должно быть равно единице. Фактически горение («догорание») при малой скорости тепловыделения продолжается в течение значительной части такта расширения рабочего тела в цилиндре, иногда даже после открытия выпускных органов (клапанов, окон). Условно принимают за момент окончания горения точку достижения $x = 0,98 \dots 0,99$. По нашему мнению, этот вопрос можно решить более строго. Для этого за момент окончания горения целесообразно принять точку z

(см. рис. 3), которая соответствует квазиadiaбатной точке e на кривой $x_i(\varphi)$, в которой $dx_i/d\varphi = 0$. Эта точка является квазиadiaбатной, так как она соответствует моменту времени, в который интенсивность выделения теплоты от догорания полностью компенсируется интенсивностью потерь теплоты в стенки цилиндра, т. е. $dx_i/d\varphi = -dx_w/d\varphi$.

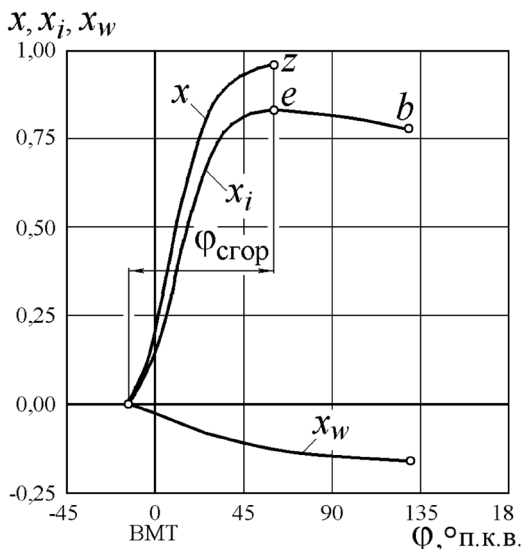


Рис. 3. Характеристики выделившейся, располагаемой теплоты и тепловых потерь

Ввиду наличия этого равенства, можно считать, что в итоге рабочее тело в рассматриваемой квазиadiaбатной точке не получает теплоту и не отдает её стенкам цилиндра. Другими словами, можно формально считать, что в указанной точке имеет место «мгновенная адиабата». Как видно, на рис. 3 в этой точке кривая относительной располагаемой теплоты $x_i(\varphi)$ достигает максимума. По окончании горения (после точки z) в процессе расширения рабочего тела x_i уменьшается, так как одна часть этой располагаемой теплоты преобразуется в полезную работу, а другая ее часть отводится в стенки цилиндра.

Предпочтительность использования квазиadiaбатной точки на кривой $x_i(\varphi)$ для определения момента окончания горения объясняется следующим образом. Составляющая x_i выделившейся теплоты обычно определяется с меньшей погрешностью, чем x_w , ввиду того, что первая оценивается по экспериментальной ИД, а вторая — по обобщенной эмпирической зависимости, которая может не вполне точно отражать условия конкретного эксперимента. Поэтому по рассмотренной квазиadiaбатной точке на кривой $x_i(\varphi)$ можно с большей определенностью, чем по кривой $x(\varphi)$, судить о моменте окончания горения и, соответственно, делать выводы о влиянии того или иного фактора на продолжительность горения. Это позволит повысить качество идентификации параметров математической модели рабочего процесса [8] и принимаемых технических решений по результатам диагностирования двигателя [9] – [11].

Зарегистрировав в эксперименте индикаторную диаграмму и выполнив её расчетный анализ, можно получить рассмотренные характеристики тепловыделения, что позволяет оценить качество процесса сгорания топлива.

Термодинамические основы методики анализа индикаторных диаграмм

Очевидно, что представляемая индикаторной диаграммой (см. рис. 1) зависимость давления в цилиндре от угла п.к.в. — $p(\varphi)$, некоторым образом отражает подведенную к рабочему телу располагаемую теплоту $Q_i(\varphi)$. Кратко изложим термодинамические основы анализа ИД на тепловыделение.

Можно достаточно просто определить давление p и объем рабочего тела V для любой точки ИД. Считаем эти величины известными. Пренебрегаем необратимостью изменения состояния ра-

бочего тела в процессе горения и принимаем допущение о неизменности массы рабочего тела M . Тогда для описания связи между p , V и Q_i можно использовать уравнение первого закона термодинамики:

$$dQ_i = dU + pdV, \quad (1)$$

где U — внутренняя энергия рабочего тела.

Выразим изменение внутренней энергии через изменение температуры и запишем:

$$dQ_i = Mc_v dT + pdV,$$

где c_v — удельная изохорная теплоемкость смеси воздуха и продуктов сгорания; T — температура рабочего тела.

Используем уравнение состояния газа $MRT = pV$, записанное в дифференциальной форме:

$$MRdT = d(pV), \quad (2)$$

где R — газовая постоянная.

Умножив члены уравнения (2) на c_v и разделив на R , получим

$$Mc_v dT = \frac{c_v d(pV)}{R}. \quad (3)$$

С учетом уравнения Майера $R = c_p - c_v$ можно записать:

$$\frac{R}{c_v} = \frac{c_p - c_v}{c_v} = k - 1,$$

где k — показатель адиабаты.

Тогда уравнение состояния (3) примет вид

$$Mc_v dT = \frac{d(pV)}{k - 1}. \quad (4)$$

Отметим, что при анализе ИД уравнение (4) может быть использовано для вычисления текущей температуры рабочего тела.

С учетом выражения (4) перепишем уравнение (1) первого закона термодинамики в виде:

$$dQ_i = \frac{d(pV)}{k - 1} + pdV. \quad (5)$$

Зная изменение определяемых по ИД текущих значений p и V , по уравнению (5) можно вычислить подводимую к рабочему телу теплоту dQ_i . Рассмотрим, как это выполняется на практике. Для участка ИД 1–2 конечной длины (см. рис. 1) с учетом уравнения (5) можно записать

$$Q_{i(1-2)} = \int_1^2 \frac{d(pV)}{k - 1} + \int_1^2 pdV. \quad (6)$$

Члены правой части уравнения (6) запишем в конечных разностях. Первый интеграл

$$\int_1^2 \frac{d(pV)}{k - 1} = \frac{p_2 V_2}{k_2 - 1} - \frac{p_1 V_1}{k_1 - 1},$$

где k_1 , k_2 — показатели текущей адиабаты.

Заменив k_1 и k_2 на средний показатель адиабаты k_{1-2} , запишем

$$\int_1^2 \frac{d(pV)}{k - 1} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{k_{1-2} - 1}. \quad (7)$$

Второй интеграл

$$\int_1^2 pdV = \frac{p_1 + p_2}{2} (V_2 - V_1). \quad (8)$$

Подставив выражения (7) и (8) в уравнение (6), получим

$$Q_{i(1-2)} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{k_{1-2} - 1} + \frac{p_2 + p_1}{2} (V_2 - V_1). \quad (9)$$

Итоговое уравнение (9) может быть использовано при анализе ИД на тепловыделение, т. е. при анализе текущей интенсивности процесса горения топлива в двигателе.

Необходимо дополнительно пояснить некоторые допущения, положенные в основу описываемой методики анализа ИД. При оценке теплоемкости c_p , указанной в уравнении (4), принимают, что в каждый момент времени рабочего цикла рабочее тело состоит из воздуха и «чистых» (конечных) продуктов сгорания. При этом не учитываются наличие и свойства промежуточных продуктов реакций горения.

Показатель адиабаты k_{1-2} , так же как c_p , невозможно определить точно. Так, значения k для продуктов сгорания и воздуха находятся пределах $k \approx 1,3 \dots 1,4$, а для большинства углеводородов, содержащихся в промежуточных продуктах горения, k близок к единице. Ввиду отсутствия сведений о составе и свойствах промежуточных продуктов, невозможно точно определить k для рабочего тела в процессе горения.

Ввиду указанных причин, допущение о том, что в каждый момент времени рабочее тело рассматривается как смесь воздуха и конечных продуктов сгорания при использовании любой из известных методик анализа ИД на тепловыделение не позволяет получить высокоточный результат. Поэтому все известные методики, включая рассматриваемую в данной статье, могут быть использованы главным образом в сравнительных исследованиях.

Методика анализа индикаторных диаграмм: основные положения методики, принятые допущения и основные операции, выполняемые в соответствии с методикой

Рассмотрим основные положения методики анализа ИД. Количество выделившейся при сгорании топлива теплоты dQ может быть определено как сумма количеств располагаемой теплоты dQ_i и потерь теплоты $dQ_{\text{пот}}$. Количество теплоты dQ_i , в соответствии с изложенными ранее термодинамическими основами, вычисляется в результате анализа ИД. Потери теплоты в общем виде можно записать в виде

$$dQ_{\text{пот}} = dQ_w + dQ_{\text{н.с}} + dQ_{\text{дис}} + dQ_{\text{ут}}, \quad (10)$$

где dQ_w — потери вследствие передачи теплоты стенкам цилиндра; $dQ_{\text{н.с}}$ — потери теплоты из-за неполноты сгорания топлива; $dQ_{\text{дис}}$ — потери теплоты на диссоциацию молекул продуктов сгорания; $dQ_{\text{ут}}$ — потери теплоты, связанные с утечками газа из надпоршневой полости цилиндра;

Ввиду малости трех последних составляющих потерь в выражении (10), ими обычно пренебрегают. Поэтому в соответствии с данной методикой количество теплоты, выделившейся при сгорании топлива

$$dQ = dQ_i + dQ_w. \quad (11)$$

Учитывая уравнения (11) и (9), количество выделившейся теплоты может быть выражено в конечных разностях:

$$Q_{(1-2)} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{k_{1-2} - 1} + \frac{p_2 + p_1}{2} (V_2 - V_1) + Q_{w(1-2)}. \quad (12)$$

Данная методика построена на основе использования уравнения (12).

В порядке обобщения изложенных термодинамических основ и положений методики приведем перечень принятых допущений:

- 1) рабочее тело рассматривается как смесь воздуха и конечных продуктов сгорания топлива, промежуточные продукты сгорания не учитываются;
- 2) потери теплоты на диссоциацию продуктов сгорания, неполноту сгорания не учитываются;

- 3) утечки рабочего тела из цилиндра в процессе горения топлива отсутствуют;
- 4) мольная масса рабочего тела считается постоянной и равной мольной массе воздуха (≈ 29 кг/кмоль);
- 5) удельная изохорная теплоемкость рабочего тела считается величиной квазипостоянной, определяемой для каждого расчетного момента времени (расчетного угла φ , °п.к.в), а ее производная по углу φ принимается равной нулю.

Основные операции, выполняемые при реализации методики, заключаются в следующем. Обработка ИД при анализе тепловыделения состоит в том, что, начиная с некоторой точки диаграммы (обычно принимают точку с «отрыва» линии сгорания от линии сжатия (см. рис. 1)), для каждого малого участка диаграммы по формуле (9) вычисляют количество подведенной к рабочему телу располагаемой теплоты Q_i . По одной из известных методик (например, с использованием эмпирической зависимости Эйхельберга для коэффициента теплоотдачи) также для каждого участка определяют количество теплоты Q_w , отведенной в стенки цилиндра. Далее, суммируя Q_i и Q_w , вычисляют количество выделившейся при сгорании теплоты Q .

Выполнив указанные операции для всех участков ИД, нарастающим итогом строят интегральную характеристику тепловыделения в дизеле $Q(\varphi)$ или аналогичную характеристику в относительном виде $x(\varphi) = Q(\varphi)/Q_c$, рассмотренную выше.

Учет погрешности измерения цикловой подачи топлива при анализе индикаторной диаграммы

Достоверность результатов анализа ИД определяет качество исследования рабочего процесса дизеля и идентификации его технического состояния [9], [10]. Большинство исследователей традиционно используется методика анализа ИД и соответствующая программа расчёта, разработанные в ЦНИДИ авторами В. П. Лазурко и В. А. Кудрявцевым. Нами эта методика усовершенствована. Новая программа издана под именем InDiagExpert [12]. Рассмотрим особенности предлагаемой методики по сравнению с традиционной.

В существующих методиках по-разному учтены возможные погрешности измерений величин, входящих в состав исходных данных расчета. Источников погрешностей, в частности случайных погрешностей, может быть много. Погрешности могут быть связаны, например, с отсутствием одновременности регистрации ИД и измерения расхода топлива на дизель (следовательно, цикловой подачи топлива). Причиной отмеченного несоответствия результата измерения расхода топлива индикаторной диаграмме может явиться недостаточно установившийся режим работы дизеля, межцикловая нестабильность подачи топлива в цилиндр, а также наличие других источников погрешностей измерений. В итоге погрешности расчета характеристик тепловыделения могут оказаться весьма значительными. Так, например, интегральная характеристика относительной выделившейся теплоты $x(\varphi)$ к моменту окончания горения может выйти на значения $x \gg 1,0$ (что, разумеется, не соответствует действительности) или, наоборот, на значения $x \ll 1,0$.

В традиционной методике рассматриваемая проблема решена методом корректировки положения верхней мертвой точки (ВМТ) поршня на диаграмме. Метод заключается в формальном смещении ВМТ относительно начала расчета на некоторый угол корректировки, который определяется путем последовательных приближений к значению, обеспечивающему достижение заранее заданного x (например, $x = 0,99$, что в соответствии с методикой принимается за условие окончания горения). Практика показывает, что указанный угол корректировки, как правило, мал. Тем не менее, рассматриваемый метод имеет существенные недостатки, которые принципиально важно рассмотреть.

Во-первых, этот метод не вполне корректен по существу. Дело в том, что реальное положение ВМТ поршня неизменно, оно измерено с некоторой постоянной для испытательного стенда инструментальной (систематической) погрешностью. Поэтому нет оснований для ввода указанной переменной поправки. Во-вторых, корректировка ВМТ на диаграмме является исключительно искусственной процедурой, которая может значительно исказить фактическую характеристику

тепловыделения как по значениям описываемых ею величин, так и по ее форме. Следует признать, что в некоторых случаях корректировка ВМТ может быть оправдана [13], [14]. Однако возникающее при этом искажение формы характеристики может существенно затруднить и снизить качество исследования влияния факторов на процесс горения топлива.

Во избежание вышеописанных недостатков в программе InDiagExpert применен предложенный нами метод нейтрализации рассматриваемых погрешностей расчета характеристик тепловыделения по ИД — метод корректировки цикловой подачи топлива. Для этого имеются достаточно веские основания, поскольку такая корректировка позволяет привести в соответствие индикаторную диаграмму действительной цикловой подачи. Возможные причины их несоответствия описаны выше. При предлагаемом методе корректировки выполняется пропорциональное изменение ординат характеристики тепловыделения, но ее форма (характер процесса горения) не изменяется. По сути, описанная процедура представляет собой приведение ИД к безразмерному виду, что позволяет вполне корректно сравнивать различные диаграммы по характеру описываемого ими процесса горения.

Опыт работы с нашей программой InDiagExpert показал, что применение предложенного метода в сравнительном анализе динамики тепловыделения вполне оправдано. Особенно это касается тех случаев, когда условия теплоотдачи от газов к стенкам цилиндра можно считать неизменными. Для иллюстрации преимуществ предложенного способа корректировки приведем результаты обработки трех многоцикловых ИД, записанных подряд в эксперименте на одном режиме работы дизеля. Полученные при этом интегральные характеристики тепловыделения приведены на рис. 4. Расчеты выполнены по традиционной программе с корректировкой ВМТ (см. рис. 4, а) и по нашей программе InDiagExpert с приведением диаграммы к безразмерному виду (см. рис. 4, б). Оказалось, что разброс значений угла поворота коленчатого вала, при котором выгорает, например, 80 % массы топлива, в первом случае составляет 9 °п.к.в., а во втором — 3 °п.к.в., т. е. в 3 раза меньше. Это означает, что с использованием программы InDiagExpert можно проводить более точные исследования влияния тех или иных факторов на процесс сгорания.

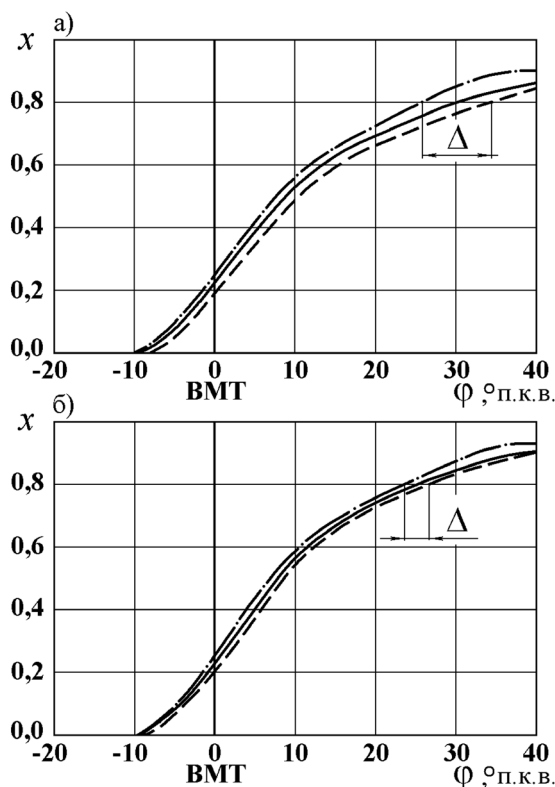


Рис. 4. Интегральные характеристики тепловыделения, полученные обработкой индикаторных диаграмм: а — по традиционной программе; б — по программе InDiagExpert

Учет погрешности измерения давления в цилиндре при анализе индикаторной диаграммы

Наряду с рассмотренными ранее погрешностями качество исследования процесса сгорания по ИД и диагностирования работы двигателя [15] определяется также погрешностями измерения текущего давления в цилиндре. На ИД часто обнаруживаются «волны», вызванные не характером процесса горения, а распространением прямых и обратных волн давления в канале, соединяющем датчик давления с полостью камеры сгорания (в измерительном канале). С иным объяснением природы указанных волн вряд ли можно согласиться. В самом деле, снижение давления в течение периода волны невозможно объяснить, например, отводом теплоты от заряда цилиндра или расширением заряда. В результате действия указанных погрешностей рассчитываемые характеристики $dx_i(\varphi)$ и, соответственно, $dx(\varphi)$ на завершающих стадиях горения (догорания) могут принимать отрицательные значения, что, разумеется, не соответствует действительности. Между тем, точность анализа догорания, происходящего в условиях недостатка кислорода воздуха, существенно определяет уровень качества исследования и диагностирования рабочего процесса двигателя.

Исследователям приходится решать задачу нейтрализации влияния рассматриваемых погрешностей измерений [16], [17]. По предложенной нами методике характеристика $dx(\varphi)$ подвергается «сглаживанию» на участке догорания. При этом осуществляется «фильтрация» сигнала давления, освобождение его от «шума», вызванного волнами давления в измерительном канале. Сглаживание производится, начиная с шага счета, на котором происходит первое изменение знака $dx(\varphi)$ так, чтобы в результате для каждого угла φ расчетного интервала оказалось

$$dx/d\varphi \geq 0. \quad (13)$$

Критерием корректности применения предложенного сглаживания является выполнение равенства:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_{окг}} (dx/d\varphi)_{сглаж} d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_{окг}} (dx/d\varphi)_{исх} d\varphi, \quad (14)$$

где φ_1 — угол первого изменения знака величины $dx/d\varphi$; $\varphi_{окг}$ — угол окончания горения; $(dx/d\varphi)_{исх}$, $(dx/d\varphi)_{сглаж}$ — соответственно исходная и сглаженная характеристики относительной скорости тепловыделения.

Сглаживание осуществляется по методу средних. При этом характеристика разбивается на участки по углу п.к.в. с шагом $\Delta\varphi$. Значение $dx/d\varphi$ на середине некоторого участка заменяется значением, «лежащим» на прямой, соединяющей $dx/d\varphi$ на серединах соседних участков. Процедура может быть выражена следующим образом:

$$\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)_{сглаж}(\varphi) = 0,25 \left[\frac{dx}{d\varphi}(\varphi - \Delta\varphi) + 2 \frac{dx}{d\varphi}(\varphi) + \frac{dx}{d\varphi}(\varphi + \Delta\varphi) \right]. \quad (15)$$

Многократное сглаживание производится от последнего участка «волны» характеристики, на котором имеет место положительное значение $dx/d\varphi = f(\varphi_1)$ до аналогичного последнего участка следующей «волны» с положительным значением $dx/d\varphi = f(\varphi_2)$. Сглаживания выполняют либо до тех пор, пока для каждого угла, лежащего в интервале (φ_1, φ_2) , ни выполнится условие (13), либо до достижения заданного числа сглаживаний. Пример результата сглаживания приведен на рис. 5.

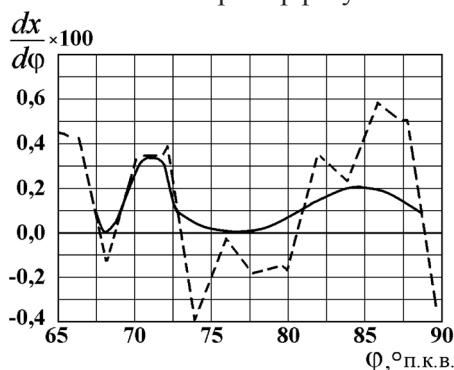


Рис. 5. Пример сглаживания характеристики скорости тепловыделения в период догорания топлива

В выполненных ранее работах [18], а также в последних версиях нашей программы использован описанный способ «сглаживания» индикаторной диаграммы, позволяющий учесть погрешности измерения текущего давления в цилиндре двигателя на стадии догорания топлива.

Заключение

Высокие показатели судового дизеля в значительной мере определяются характером и параметрами процесса выделения теплоты при сгорании топлива. Рациональная организация этого процесса требуется как при создании дизеля, так и в течение всего срока его эксплуатации. Используемые при этом диагностические системы нуждаются в совершенствовании, в частности, методик анализа индикаторных диаграмм. Для этого авторами данной статьи изложены теоретические основы анализа процесса горения топлива в судовом дизеле по экспериментальным индикаторным диаграммам и разработана методика уточненного расчета характеристик тепловыделения при горении по указанным диаграммам.

Вполне строго, в соответствии с положениями термодинамики показано, как располагая экспериментально полученной зависимостью давления в цилиндре двигателя от угла поворота коленчатого вала, можно получить характеристики процесса выделения теплоты при сгорании топлива. При этом предложен и обоснован термин «располагаемая теплота», предложено оценивать продолжительность сгорания по положению квазиadiaбатной точки на характеристике располагаемой теплоты.

Рассмотрены некоторые причины погрешностей в исходных данных для анализа индикаторных диаграмм, предложены и обоснованы способы корректировки указанных данных. В частности, предложены способ корректировки цикловой подачи топлива и способ «фильтрации» сигнала давления, освобождение его от «шума», вызванного волнами давления в измерительном канале, возникающими при регистрации индикаторной диаграммы рабочего процесса двигателя.

Практика показывает, что использование предложенной методики и соответствующей программы анализа индикаторных диаграмм обеспечивают требуемое качество результатов исследования влияния различных факторов на процесс горения топлива в дизеле и способствуют высокому качеству его диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тузов Л. В. Определение параметров тепловыделения по экспериментальной индикаторной диаграмме дизельного двигателя / Л. В. Тузов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 62–69.
2. Обозов А. А. Алгоритм поиска корректного положения отметки ВМТ в системах диагностики судовых дизелей / А. А. Обозов // Двигателестроение. — 2006. — № 1. — С. 27–30.
3. Лашко В. А. Средства и методы диагностирования дизелей по индикаторной диаграмме рабочего процесса / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. — 147 с.
4. Гусаков С. В. Простая модель действительного рабочего цикла ДВС, учитывающая характер тепловыделения / С. В. Гусаков, А. М. Довольнов // Труды международной конференции «Двигатель-2007», 19–21 сентября 2007 г. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — С. 53–57.
5. Коньков А. Ю. Диагностирование технического состояния тепловозного дизеля по индикаторной диаграмме на основе теории идентификации / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко // Двигателестроение. — 2009. — № 3. — С. 19–23.
6. Грехов Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков. — М.: Легион-Автодата, 2004. — 344 с.
7. Луканин В. Н. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. Кн 1. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян [и др.]; под ред. В. Н. Луканина, М. Г. Шатрова. — М.: Высш. шк., 2007. — 479 с.
8. Лашко В. А. Применение методов имитационного моделирования рабочих процессов дизеля при интерпретации результатов диагностического эксперимента / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2007. — № 6. — С. 46–53.

9. Лашко В. А. Метод идентификации технического состояния дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков, А. А. Маркелов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2007. — № 1. — С. 57–68.

10. Лашко В. А. Идентификация технического состояния дизеля по индикаторной диаграмме с учётом особенностей эксперимента в условиях эксплуатации / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Труды международной конференции «Двигатель-2007», 19–21 сентября 2007 г. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — С. 547–551.

11. Коньков А. Ю. Количественное оценивание износов и разрегулировок тепловозного дизеля по данным индицирования рабочих процессов / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко, В. Г. Кочерга // Вестник СамГУПС. — 2009. — Вып. 5(17). — С. 102–109.

12. Гаврилов В. В. Программа InDiagExpert расчета характеристик тепловыделения в дизеле по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Четвёртая Всероссийская межотраслевая научно-техническая конференция «Актуальные проблемы морской энергетики». Санкт-Петербург, 12–13 февраля 2015 г.: материалы конф. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2015. — С. 45–46.

13. Лашко В. А. Расчётный метод коррекции действительного положения ВМТ при индицировании ДВС / В. А. Лашко // Двигателестроение. — 2007. — № 3. — С. 34–38.

14. Лашко В. А. Получение индикаторной диаграммы при асинхронном измерении сигнала давления / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Двигателестроение. — 2007. — № 4. — С. 33–37.

15. Маркелов А. А. Диагностирование дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Маркелов. — Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т, 2007. — 175 с.

16. Обозов А. А. Алгоритмы сглаживания индикаторных диаграмм / А. А. Обозов // Судостроение. — 2006. — № 4. — С. 38–41.

17. Приходько В. М. Цифровая фильтрация вариационных рядов на ПЭВМ в отрасли водного транспорта / В. М. Приходько, А. М. Приходько // XII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2010)». Санкт-Петербург, 20–22 октября 2010 г.: материалы конф. — СПб.: РАН, 2010. — С. 213–214.

18. Гаврилов В. В. Методы повышения качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле на основе математического и физического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов: автореф. ... д-ра техн. наук / В. В. Гаврилов. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 43 с.

THEORETICAL FOUNDATIONS AND PROCEDURE OF THE ANALYSIS OF PROCESS OF COMBUSTION OF SHIP INTERNAL COMBUSTION ENGINES ACCORDING TO INDICATOR DIAGRAMS

The accurate information about fuel combustion process in engines is required for improvement of ship diesel engines and systems of their diagnostics. The article deals with thermodynamic foundations and a procedure of more precise calculation of characteristics of heat release from combustion according to experimental indicator diagrams. The term “effective heat” is suggested estimating the duration of combustion by a position of “quasiadiabatic point” of the characteristic of effective heat. Some reasons of errors in the initial data are researched for the analysis of indicator diagrams. In particular, inaccuracies are described in specifying of cyclic supply of fuel and measurement of current pressure in an engine cylinder while recording the indicator diagram. The ways of correcting the specified initial data are suggested and justified for the purpose of recording the specified errors. The practical application of the suggested procedure and relevant program of indicator diagrams analysis are maintained to provide the required quality of research results of various factors in fuel combustion process in a diesel engine and contribute to the high quality of its diagnostics.

Keywords: operation process of a diesel engine, heat release from combustion, characteristics of heat release, errors of recording the indicator diagrams, record of errors.

REFERENCES

1. Tuzov, L. V. “Definition of parameters of the thermal emission under the experimental display diagram of the diesel engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(21) (2013): 62–69.

2. Obozov, A. A. "Algorithm of Correct Determination of TDC Position in Diagnostic Systems of Marine Diesel Engines." *Dvigatolestroyeniye* 1 (2006): 27–30.
3. Lashko, V. A., and A. Ju. Konkov. *Sredstva i metody diagnostirovaniya dizelej po indikatornoj diagramme rabocheho processa*. Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2007.
4. Gusakov, S. V., and A. M. Dovolnov. "Prostaya model dejstvitel'nogo rabocheho cikla DVS, uchityvajushhaya karakter teplovydeleniya." *Trudy mezhdunarodnoj konferencii «Dvigatel-2007»*, 19–21 sentjabrja 2007 g. M.: MGTU im. N. Je. Bauman, 2007: 53–57.
5. Konkov, A. Yu., and V. A. Lashko. "Diagnosis of a Locomotive Engine by Means of Indicator Diagram Based on Identification Theory." *Dvigatolestroyeniye* 3 (2009): 19–23.
6. Grehov, L. V., N. A. Ivashhenko, and V. A. Markov. *Toplivnaja apparatura i sistemy upravleniya dizelej*. M.: Legion-Avtodata, 2004.
7. Lukanin, V. N., K. A. Morozov, A. S. Hachijan, et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. V 3 kn. Kn 1. *Teoriya rabochih processov*. M.: Vysshaja shkola, 2007.
8. Lashko, V. A., and A. Yu. Konkov. "Primenenie metodov imitacionnogo modelirovaniya rabochih processov dizelja pri interpretacii rezultatov diagnosticheskogo jeksperimenta." *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building* 6 (2007): 46–53.
9. Lashko, V. A., A. Y. Konkov, A. A. Markelov. "The method of technical condition identification for a diesel engine by the display diagram analysis under the condition of ordinary operation." *Bulletin of PNU* 1 (2007): 57–68.
10. Lashko, V. A., and A. Ju. Konkov. "Identifikacija tehničeskogo sostojaniya dizelja po indikatornoj diagramme s uchjotom osobennostej jeksperimenta v uslovijah jekspluatacii." *Trudy mezhdunarodnoj konferencii «Dvigatel-2007»*, 19–21 sentjabrja 2007 g. M.: MGTU im. N. Je. Bauman, 2007: 547–551.
11. Konkov, A. Yu., V. A. Lashko, and V. G. Kocherga. "Quantitative evaluation of wears and disarrangements in a diesel engine on the basis of work process indexing." *Bulletin of SamGUPS* 5-1 (2009): 102–109.
12. Gavrilov, V. V., and V. Ju. Mashhenko. "Programma InDiagExpert rascheta harakteristik teplovydeleniya v dizele po indikatornym diagrammam." *Chetvjortaja Vserossijskaja mezhotraslevaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Aktualnye problemy morskoy jenergetiki»*. Sankt-Peterburg, 12-13 fevralja 2015 g.: Materialy konferencii. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2015: 45–46.
13. Lashko, V. A., and A. Yu. Konkov. "Analytical Correction of Actual TDC Position as Defined from Engine Indicator Diagram." *Dvigatolestroyeniye* 3 (2007): 34–38.
14. Lashko, V. A., and A. Yu. Konkov. "Indicator Test Based on Asynchronous Pressure Measurement." *Dvigatolestroyeniye* 4 (2007): 33–37.
15. Markelov, A. A. *Diagnostirovanie dizelja po rezultatam raschjotno-jeksperimentalnogo issledovanija indikatornoj diagrammy v uslovijah rjadovoj jekspluatacii*. PhD diss. (Tech.). Habarovsk: TGU, 2007.
16. Obozov, A. A. "Smoothing algorithms of indicator diagrams." *Sudostroenie* 4 (2006): 38–41.
17. Prihodko, V. M., and A. M. Prihodko. "Cifrovaja filtracija variacionnyh rjadov na PJeVM v otrasli vodnogo transporta." XII Sankt-Peterburgskaja mezhduna-rodnaja konferencija «Regionalnaja informatika (RI – 2010)». Sankt-Peterburg, 20–22 oktjabrja 2010 g.: *Trudy konferencii / SPOISU*. SPb.: RAN, 2010: 213–214.
18. Gavrilov, V. V. *Metody povyshenija kachestva smeseobrazovanija i sgoraniya v sudovom dizele na osnove matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya lokal'nyh vnutricilindrovych processov*. Abstract of dr. diss. (Tech.). SPb.: SPbGMTU, 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаврилов Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
gavrilov@VG5647.spb.edu
Мащенко Владимир Юрьевич —
кандидат технических наук,
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет»
masvladimir@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gavrilov Vladimir Vasilyevich —
Dr. of Technical Science, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
gavrilov@VG5647.spb.edu
Mashchenko Vladimir Yurievich —
PhD, senior lecturer.
Saint-Petersburg State Marine Technical
University
masvladimir@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 3 декабря 2015 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 629.123:621.31

**А. В. Григорьев,
Р. Р. Зайнуллин,
С. М. Малышев**

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ГАЗОТУРБОГЕНЕРАТОРОВ НА МОРСКОМ ФЛОТЕ

В статье рассмотрены перспективы применения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте. В настоящее время наиболее широкое применение в качестве судовых источников электроэнергии находят дизель-генераторные агрегаты (ДГА), в том числе за счет сравнительно высокой экономичности. Единичная мощность генераторных агрегатов на судах с электродвижением может превышать десятки мегаватт. На таких значительных мощностях целесообразность использования ДГА значительно снижается, что связано с их высокими массогабаритными показателями. В статье предлагается для привода генераторов использовать двухтопливные газотурбинные двигатели, способные работать как на газовом, так и на жидком топливе. Использование в составе газотурбогенераторных агрегатов (ГТА) полупроводниковых преобразователей частоты (ППЧ) позволит повысить экономичность путем регулирования двигателей по оптимальной с точки зрения расхода топлива характеристике. Частота и напряжение в этом случае будут поддерживаться постоянными с помощью ППЧ. Приведен состав и принцип действия вентильных ГТГА (ВГТГА) нового поколения.

Ключевые слова: генераторный агрегат, газотурбинный двигатель, вентильный генератор, полупроводниковый преобразователь частоты.

Введение

На судах морского флота наиболее широкое применение в качестве источников электроэнергии в настоящее время находят дизель-генераторные агрегаты (ДГА) [1], к достоинствам которых, прежде всего, следует отнести сравнительно высокую экономичность. Газовые турбодвигатели (ГТД) в связи с малым временем, необходимым для подготовки к пуску, и высокой удельной мощностью использовались в основном на кораблях Военно-морского флота [2].

Область применения газовых турбоэлектродвигательных агрегатов (ГТГА) в составе энергетических установок объектов морской и береговой нефтегазодобычи в течение последних 15 – 20 лет увеличивается быстрыми темпами. Так, единичная мощность судовых генераторных агрегатов на современных судах с электродвижением может превышать десятки мегаватт. На таких значительных мощностях целесообразность использования ДГА значительно снижается, что связано с их низкими массогабаритными показателями. В этом случае наиболее оптимальным решением является применение в качестве приводных вспомогательных двигателей двухтопливных газовых турбоагрегатов, способных работать как на газовом, так и на жидком топливе.

Сравнительный анализ дизельных и газотурбинных двигателей

Основными достоинствами ГТГА являются их компактность, малый вес, лучшие, чем у дизелей, виброшумовые характеристики, многотопливность, лёгкость запуска при низких температурах, возможность получения больших агрегатных мощностей в габаритах, позволяющих транспортировку железнодорожным и авиационным транспортом для установки или замены на судостроительном заводе или в порту.

Результаты сравнительного анализа типовых дизельных и газотурбинных двигателей, проведенного на основе данных ведущих мировых производителей, приведены на рис. 1.

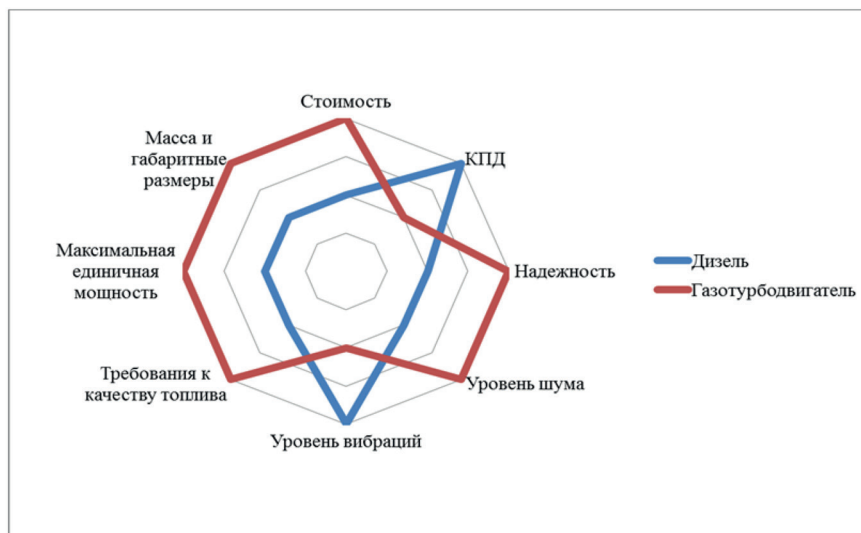


Рис. 1. Сравнительные диаграммы дизельных и газотурбинных двигателей

Перспективы применения газотурбогенераторов

Плавучие, прибрежные и береговые производства по переработке углеводородного сырья имеют, в основном, газотурбинную энергетику. Применение ГТГА обеспечивает возможность строительства автономных объектов, в том числе морских буровых платформ с установленной электрической мощностью до 100 ... 150 МВт. При этом единичная мощность ГТГА может достигать 35 МВт. ГТГА могут применяться в судовых системах электродвижения и электроснабжения круизных лайнеров, буровых судов и судов комплексной добычи, переработки транспортировки и хранения углеводородного сырья [3].

Потребность в российской морской газотурбинной энергетике велика, в том числе в связи с освоением месторождений углеводородного сырья в Арктике, на Дальнем Востоке России и в Сибири. Необходимо отметить, что строительство морских и приморских объектов с газотурбинными энергоустановками в настоящее время осуществляется исключительно с применением импортных ГТГА.

В последние годы наблюдается стремительный рост добычи природного газа в прибрежной морской зоне. Намечилась устойчивая тенденция увеличения объема перевозок природного газа морским транспортом, что привело к необходимости постройки и ввода в эксплуатацию новых специализированных судов, перевозящих газ в сжиженном состоянии, — танкеров-газовозов.

Ежегодные темпы роста продажи сжиженного природного газа (СПГ) более чем в 1,5 раза превышают аналогичный показатель трубопроводного газа. Диаграмма роста процентной доли СПГ в международной торговле природным газом приведена на рис. 2.

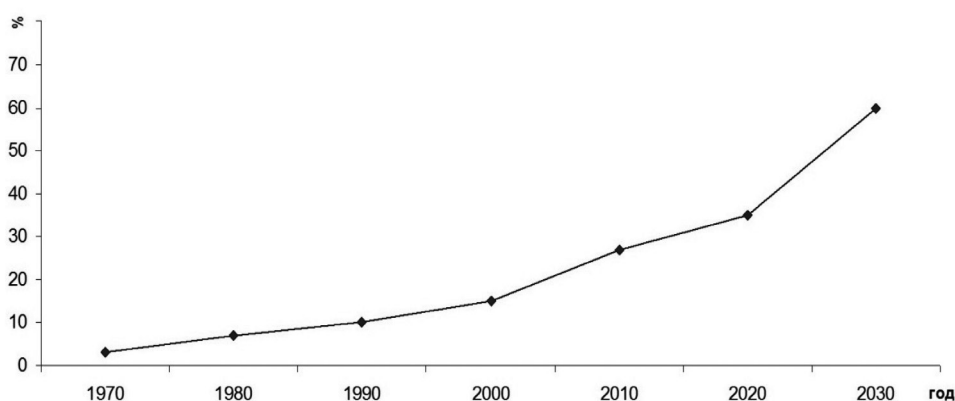


Рис. 2. Процентная часть СПГ в объеме международной торговли природным газом

Газовый турбоэлектрогенераторный агрегат традиционной конструкции

ГТГА традиционной конструкции, используемой на морских и береговых объектах, приведен на рис. 3. В его состав входит ГТД, синхронный генератор (СГ) и понижающий редуктор (Р). Редуктор необходим для понижения частоты вращения ГТД до номинальной частоты вращения электрогенератора.

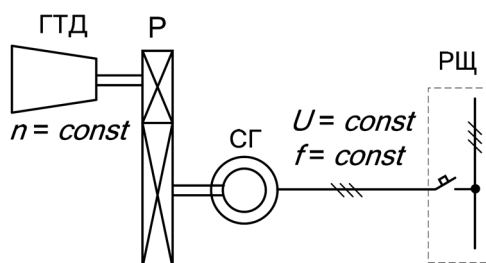


Рис. 3. Структурная схема традиционного ГТГА

Частота вращения СГ традиционной конструкции с явно выраженными полюсами не превышает 3000 мин^{-1} . Для согласования частоты вращения ГТД и генератора применяется понижающий редуктор. Наличие редуктора снижает КПД и надежность ГТГА, повышает его массогабаритные показатели. При этом ГТГА данного типа работают с постоянством частоты вращения, что значительно снижает его экономичность при работе на долевой нагрузке.

Вентильный газовый турбоэлектрогенераторный агрегат

Одним из перспективных научно-технических решений является применение в составе ГТГА вентильных турбоэлектрогенераторов (ВТГ) на базе высокооборотных синхронных электрогенераторов с возбуждением на постоянных магнитах, что позволяет исключить из состава ГТГА понижающий редуктор. СГ высокой мощности с постоянными магнитами ранее в судостроении и автономной электроэнергетике не применялись. Их использование позволяет повысить КПД и надежность установки, снизить эксплуатационные расходы, улучшить массогабаритные показатели [4].

Для получения напряжения стандартной величины (380 В, 690 В или 6300 В) и частоты (50 или 60 Гц) к выходу генератора подключается полупроводниковый преобразователь частоты (ППЧ), стабилизирующий параметры электроэнергии для выдачи в судовую сеть [5], [6]. Использование в составе ГТГА ППЧ позволит повысить экономичность, путем регулирования агрегатов по оптимальной с точки зрения расхода горюче-смазочных агрегатов характеристике [7] – [9]. Структурная схема ВТГА приведена на рис. 4.

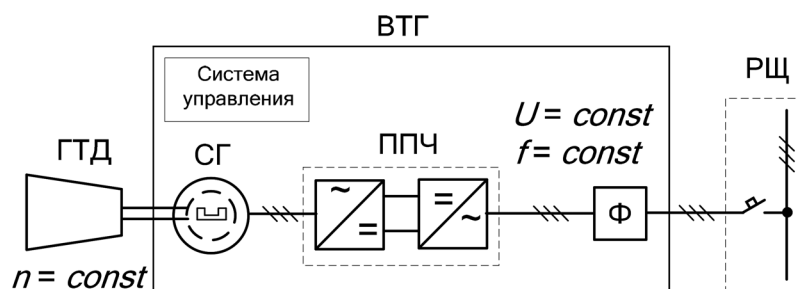


Рис. 4. Структурная схема ВТГА

Применение ВТГ позволяет существенно повысить технико-экономические показатели ГТГА и увеличить их функциональные возможности, в том числе:

- снизить массу и габаритные размеры агрегата;

- обеспечить возможность модульного исполнения ГТГА;
- обеспечить регулирование ГТГА по оптимальной характеристике с переменной частотой вращения, что значительно снижает расход топлива;
- реализовать режим длительной параллельной работы вентильного ГТГА с дизель-генераторными агрегатами [10];
- значительно упростить систему управления и регулирования ГТГА.

В составе ВТГ может использоваться обратимый ППЧ нового поколения на базе активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения. Использование обратимого ППЧ позволяет реализовать работу ВТГ в режиме электропривода для стартерного запуска ГТД.

Выводы

1. В связи с активным применением в судостроении систем электродвижения и ростом мощности судовой электроэнергетической системы наиболее перспективным источником электроэнергии становится газовый турбогенераторный агрегат, способный работать как на мазуте, так и на газовом топливе.

2. ГТГА по ряду показателей превосходят судовые дизель-генераторные агрегаты, однако среди их недостатков следует отметить сравнительно низкую экономичность. Для повышения экономичности работы ГТГА целесообразно применять вентильные генераторы, что позволит регулировать частоту вращения агрегата по оптимальной с точки зрения расхода топлива характеристике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овсянников М. К. Судовые дизельные установки: справочник / М. К. Овсянников, В. А. Петухов. — Л.: Судостроение, 1986. — 424 с.
2. Вудворд Дж. Морские газотурбинные установки / Дж. Вудворд; пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1979. — 360 с.
3. Григорьев А. В. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 40–46.
4. Решетов С. А. Электрооборудование воздушных судов / С. А. Решетов. — М.: Транспорт, 1991. — 319 с.
5. Анисимов Я. Ф. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок / Я. Ф. Анисимов, Е. П. Васильев. — Л.: Судостроение, 1990.
6. Качество электрической энергии на судах: справочник / под ред. В. В. Шейнихович. — Л.: Судостроение, 1988.
7. Григорьев А. Судовой полупроводниковый преобразователь нового поколения на базе силовых модулей SKiiP / А. Григорьев, А. Колпаков, Ю. Кулагин, Р. Митрофанов // Силовая электроника. — 2010. — № 27. — С. 47–50.
8. Григорьев А. В. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 39–43.
9. Григорьев А. В. Анализ режимов эксплуатации судовых валогенераторных установок с преобразователями частоты и синхронными компенсаторами / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 164–171.
10. Константинов В. Н. Системы и устройства автоматизации судовых электроэнергетических установок. — 2-е изд., перераб. и доп. / В. Н. Константинов. — Л.: Судостроение, 1988. — 312 с.

OPPORTUNITIES OF INRODUCTION OF SHIP VALVE GAS TURBOGENERATORS IN MARINE FLEET

In the article opportunities of using of valve gas turbine generator aggregates in marine fleet are considered. Nowadays diesel-generator aggregates got the most widespread application as ship source of electrical energy,

including due to relatively high efficiency. Single power of generator aggregates on ships with electrical propulsion plants can exceed tens of megawatts. With such significant power feasibility of using of diesel-generator aggregates decreases greatly due to weight and mass parameters. The article offers to use bi fuel gas turbine engines for drive of generators, which can operate on gas and liquid types of fuel. Using of semiconductor frequency converters in gas turbine generator aggregates allows to increase efficiency due to regulating of engines by optimal curve of fuel consumption. In this case frequency and voltage will be supported constant by semiconductor frequency converter. Composition and operation principle of valve gas turbine generator aggregates of new generation are described.

Keywords: generator aggregate, gas turbine engine, valve generator, semiconductor frequency converter.

REFERENCES

1. Ovsyannikov, M. K., and V. A. Petuhov. *Sudovye dizelnye ustanovki*. Catalogue. L.: Sudostroenie, 1986.
2. Woodward, John B. *Marine gas turbines*. L.: Sudostroenie, 1979.
3. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. "Analysis of possibility and expediency of using of electrical propulsion plants on ships for auxiliary fleet." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 40–46.
4. Reshetov, S. A. *Elektrooborudovanie vozdukhnykh sudov*. M.: Transport, 1991.
5. Anisimov, Y. F., and E. P. Vasilyev. *Elektromagnitnaya sovmestimost' poluprovodnikoviykh preobrazovateley i sudoviykh elektroustanovok*. L.: Sudostroenie, 1990.
6. *Kachestvo elektricheskoy energii na sudakh*: Catalogue / under edition of V.V. Sheynihovich. L.: Sudostroenie, 1988.
7. Grigoryev, A., A. Kolpakov, Y. Kulagin, and R. Mitrofanov. "Sudovoy poluprovodnikovyy preobrazovatel' novogo pokoleniya na baze silovyykh modulej SKiiP." *Silovaya Elektronika* 27 (2010): 47–50.
8. Grigoryev, A. V., and V. Y. Kolesnichenko. "Improving the efficiency of marine diesel power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 39–43.
9. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. "Analysis of operation modes of ship shaft generator plants with frequency converters and synchronous compensators." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 164–171.
10. Konstantinov, V. N. *Sistemy i ustroystva avtomatizatsii sudoviykh elektroenergeticheskikh ustanovok*. L.: Sudostroenie, 1988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
2000iav@mail.ru, kaf_saees@gumrf.ru
Зайнуллин Руслан Ринатович — соискатель.
Научный руководитель:
Григорьев Андрей Владимирович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
ruslan_z_86@mail.ru
Малышев Сергей Михайлович — аспирант.
Научный руководитель:
Григорьев Андрей Владимирович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
malyshevsergey@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev Andrey Vladimirovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
2000iav@mail.ru, kaf_saees@gumrf.ru
Zaynullin Ruslan Rinatovich — applicant.
Supervisor:
Grigoryev Andrey Vladimirovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
ruslan_z_86@mail.ru
Malyshev Sergey Mihaylovich — postgraduate.
Supervisor:
Grigoryev Andrey Vladimirovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
malyshevsergey@list.ru

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО СУДОВОЖДЕНИЯ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

В настоящее время международная транспортная политика нацелена на разработку и внедрение новой модели управления потоками судов, что ведет к повышению уровня безопасности судоходства. Вместе с тем, поиск финансовых преференций заставляет судовладельцев исследовать пути инновационного развития отрасли, которые позволят найти нестандартный систематизированный подход, учитывающий современные сетевые, пространственные интегрирующие подсистемы и технологии. В этом формате на преобладающий этап развития выходит Национальная техническая инициатива (НТИ) — программа мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России, в том числе и по созданию роботизированных объектов водного транспорта, функционирующих по принципу беспилотного судовождения. Принципы беспилотной эксплуатации на различных видах транспорта уже частично реализованы и работают в тестовом режиме. Существует ряд подходов к решению данной проблемы: это создание роботизированных объектов с различной степенью автономности и использование инфокоммуникационных технологий для оказания различного рода дистанционного воздействия на данные объекты. При решении подобных задач необходимо учитывать ряд научно-технических вопросов и проблем, часть из которых рассматриваются в данной статье.

Ключевые слова: автоматизированная система управления движением судов (АСУДС), контрольно-корректирующая станция (ККС), дифференциальное поле, безопасность мореплавания, роботизированный объект водного транспорта, беспилотное судовождение.

В НАСТОЯЩЕЕ время у специалистов отрасли особый интерес вызывают вопросы, связанные с разработкой и внедрением роботизированных объектов водного транспорта (РОВТ), функционирующих по принципу беспилотного судовождения, рассмотренные в работе [1]. Указанные объекты могут быть разработаны для различных условий и районов плавания. В связи с этим необходимо найти конструктивные решения ряда задач, обусловленных, в том числе, и предполагаемым районом эксплуатации РОВТ. Как свидетельствуют перспективные разработки в рассматриваемой предметной области, для построения РОВТ достаточно конструктивным решением считается использование автоматизированных систем управления (АСУ), строящихся на интеллектуальных сенсорах-камерах, радарх и лазерах. С помощью подобных АСУ представляется возможным перейти к созданию адаптивных полуавтоматических и автоматических систем контроля движения РОВТ. Это позволит РОВТ в режиме реального времени производить сбор доступной и необходимой информации для обеспечения необходимого уровня безопасности судоходства: данных о погоде, транспортных потоках, навигационных опасностях и проч. Обработав информацию, РОВТ, на основе логических алгоритмов, должны выбирать оптимальные и безопасные маршруты движения [2].

Так, например, американские специалисты, начиная с 2008 г., проводят испытания беспилотного боевого катера «Protector» («Защитник»), длина которого составляет около 10 м, дедвейт — 1 т, развиваемая скорость может достигать 40 уз (рис. 1). Катер предназначен для защиты боевых кораблей США от террористических атак, перехвата судов наркоторговцев и контрабандистов в Мексиканском заливе и охраны нефтяных платформ [3].

«Protector» оснащён камерами, радаром и электронным оборудованием для обеспечения совместимости с другими судами [4]. Американская компания *Textron* в 2013 г. перешла к производству полностью безэкипажного катера, получившего название CUSV (Common Unmanned Surface Vessel). Указанный РОВТ предназначен для выполнения работы, выполнение которой мо-

жет угрожать жизни или здоровью человека (спасательные работы в штормовых условиях, борьба с загрязнениями окружающей среды и др.). Размер CUSV в длину — 12 м, максимальная скорость — 28 уз, автономность — 72 ч. CUSV может управляться дистанционно с берега, корабля или самолета на расстоянии до 20 км, при использовании спутниковых каналов связи, радиус действия может достигать 2000 км [5].



Рис. 1. Беспилотный катер «Protector»

Достаточно интересной представляется разработка военно-промышленного концерна *Israel Aerospace Industries*, функционирующая на принципах беспилотных летательных аппаратов под названием «Катана» (рис. 2). Длина судна составляет 12 м, ширина — 2,8 м, судно имеет два мощных двигателя, что позволяет развивать скорость до 60 уз, кроме того стоит отметить полностью герметичный корпус, который в сочетании с примененной САУ позволяет осуществлять эксплуатацию данного судна при любых гидрометеорологических условиях [6]. Обследуя морскую территорию с удалением до 200 миль от берега, судно позволяет контролировать ситуацию вокруг портов, буровых установок для добычи газа и нефти, газовых терминалов и подводных трубопроводов, расположенных в исключительной экономической зоне. Причём «Катана» может управляться как дистанционно, так и в автоматическом режиме. Судовые системы в режиме реального времени осуществляют обнаружение, идентификацию и классификацию близких и отдаленных целей. Электрооптические системы, используемые на борту «Катаны», позволяют лицу, управляющему судном, дистанционно видеть как перспективу, так и конкретные цели [7].



Рис. 2. Беспилотный катер «Катана»

Белорусские инженеры в 2013 г. создали и провели успешные испытания беспилотного катера ММКБ (многоцелевой морской беспилотный комплекс), управлять которым оператор может из любой точки мира (рис. 3). В настоящее время в проекте совершенствования ММКБ участвуют три страны: Россия, Китай и Беларусь [8].



Рис. 3. Многоцелевой морской беспилотный комплекс

По словам специалистов, ММКБ позволяет выполнять различные задания в удалении от берега до 360 км с автономностью 5 сут. Управление ММКБ осуществляется с использованием спутникового канала передачи данных. Длина катера составляет около 6 м, ширина 1,8 м. Максимальная скорость движения может достигать 100 км/ч.

Отметим, что «яхтенный рынок» не только пристально наблюдает за проектами ВПК, но и активно участвует в собственных исследовательских разработках. В 2012 г. была спущена на воду 42-метровая гибридная яхта-тримаран «Adastra» (рис. 4), над созданием которой проектанты трудились более пяти лет. На ней могут с удобством разместиться девять гостей и пять членов экипажа [9]. Просторная каюта-люкс для владельца расположена впереди, на главной палубе, а пять гостевых кают — на нижней палубе. Яхта уникальна по многим параметрам. В ней воплощены самые передовые и инновационные технологии. Корпус тримарана выполнен из сверхпрочного углеродистого волокна с элементами кевлара и стекла, что значительно уменьшает его вес. При длине 42 м и ширине 16 м «Adastra» имеет вес всего 52 т, что, несомненно, представляется значительным достижением. Максимальная скорость судна составляет 22 уз, а в экономичном режиме, при достаточно оптимальной скорости в 17 уз, тримаран может преодолеть расстояние в 4000 морских миль. Основной особенностью «Adastra» представляется возможность управления при помощи планшета iPad на расстоянии до 50 м от судна.



Рис. 4. Яхта с дистанционным управлением

Безусловно, и гражданское судостроение настроено на развитие безэкипажного судоходства. Судоходная отрасль находится в процессе интенсивного обсуждения компьютеризированных систем управления судами с берега. Увеличение объемов грузоперевозок, растущие экологические проблемы и нехватка будущих моряков — со всем этим могут справиться беспилотные корабли. Британская инженерная компания *Rolls-Royce*, одна из ведущих мировых поставщиков коммерческой судоходной отрасли, считает, что судно без экипажа и с дистанционным управлением будет безопаснее и дешевле, чем обычное. Корпорация предложила новую идею: самоуправляемые автоматические грузовые корабли, которые будут выходить в открытое море только при помощи береговых диспетчеров (рис. 5, а). В морском подразделении компании уже создан виртуальный аналог командной рубки этого корабля [10].

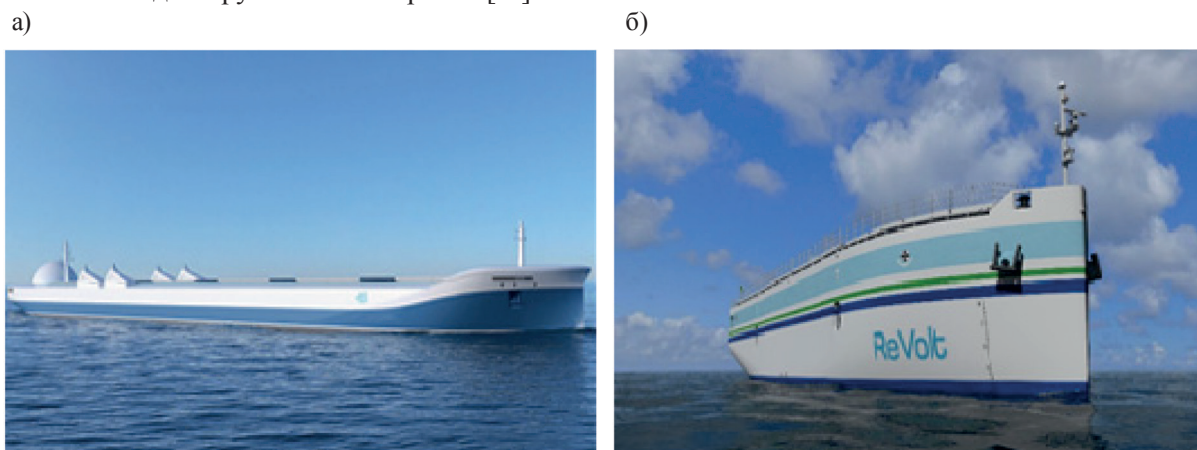


Рис. 5. Модель беспилотного судна (а),
концепт роботизированного судна «ReVolt» (б) корпорации *Rolls-Royce*

Согласно данным консалтинговой компании *Moore Stephens LLP*, около 44 % общих эксплуатационных расходов при эксплуатации среднестатистического судна, как правило, идет на обеспечение экипажа. Возникает дилемма противопоставления — иметь 20 членов экипажа на борту или пять в диспетчерской на берегу?

В Норвегии, под руководством классификационного общества *DNV GL*, ведется разработка концепта роботизированного судна для автономного каботажного плавания, причем в качестве основного источника энергии предпочтение отдано электричеству (рис. 5, б). Судно работает на аккумуляторных батареях, что полностью исключает вредные выбросы, автономность плавания между подзарядками должна составлять не менее 100 морских миль, при средней скорости движения 6 уз [11]. Отсутствие экипажа на борту судна обуславливает конструктивные особенности, включающие отсутствие надстройки и дополнительного оборудования и ряда общесудовых систем, что позволяет увеличить вместимость судна и снизить себестоимость перевозки. По предварительным оценкам *DNV GL*, экономия за 30-летний жизненный цикл подобного судна составит по меньшей мере \$34 млн по сравнению с обычным судном подобного тоннажа.

Кроме того, Евросоюз во главе с немецкими специалистами, участвует в разработке новой системы автономного управления судами, позволяющей грузовым судам совершать океанские переходы без экипажа на борту. Указанный проект получил название «Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks» (MUNIN). По мнению участников проекта, современные технологии уже в наши дни позволяют повысить эффективность грузовых морских перевозок и, тем самым, улучшить коммерческую привлекательность отрасли. Сейчас в *MUNIN* сооружена модель капитанского мостика с навигационными инструментами, штурвалом и кнопками управления, а также компьютерными мониторами, имитирующими вид на океан (рис. 6).

Благодаря видеокамерам, радарам и датчикам, регистрирующим температуру заборной воды и воздуха, скорость и направление ветра, волнение и прочие параметры, автономная система

навигации могла бы самостоятельно определять оптимальный курс судна. Кроме того, в случае наличия ситуации чрезмерного сближения судов, автоматизированная система должна определить необходимый маневр для расхождения, осуществить маневрирование и обеспечить должный контроль при расхождении судов. Также будет предусмотрена возможность удаленного управления судном. В случае возникновения непредвиденных ситуаций в море или технических неполадок на борту вахтенная береговая служба должна произвести адекватные действия по нормализации обстановки на судне и восстановлению штатного режима плавания.

Проект MUNIN не предполагает автоматизированного плавания в прибрежных водах, где интенсивность судоходства очень велика. Предполагается, что из порта отправления в открытое море судно будет выводить экипаж, который затем вернется на берег. Далее судно, управляемое теперь уже бортовым компьютером под контролем оператора на суше, продолжит свой путь через океан, а у порта назначения на борт снова взойдет экипаж и примет управление на себя [12].

Кроме существующих технических проблем, сопровождающих разработчиков РОВТ, на сегодняшний день имеют место и проблемы юридического характера. Так, например, в соответствии с международным морским правом, беспилотный флот «вне закона», и для его внедрения в эксплуатацию потребуется полный пересмотр режима регулирования мореплавания. Практическая реализация такой схемы — дело далекого будущего уже хотя бы по причинам правового характера. На сегодняшний день любое судно, находящееся в открытом море без экипажа на борту, считается ничейным, т. е. бесхозным, и его может присвоить себе любой, кто поднимется на борт. Поэтому массовое использование грузовых судов-роботов возможно после устранения существующих правовых коллизий.

Мы помним, что 20 – 30 лет назад экипажи грузовых судов превосходили по численности нынешние команды в 1,5 – 2 раза, и процесс по сокращению минимального состава экипажа был всегда противоречив и неоднозначен. Возрастает нагрузка на оставшихся членов экипажа, распределяются обязанности, не свойственные специалистам другого профиля.



Рис. 6. Виртуальный капитанский мостик грузового корабля по проекту MUNIN

Таким образом, в автономном управлении судном может быть гуманный промежуточный вариант, что сделает возможным снижение нагрузки на экипажи и постепенное сокращение их численности. В частности, транзитные линейные вахты могут быть отменены, а судно будет пере-

ходить на автономный режим или на дистанционное управление с суши. Такая схема представляется особенно важной, нужной и гуманной сейчас, когда в сфере грузовых перевозок все шире применяется концепция «Slow Steaming» [13]. Она заключается в снижении скорости хода судна ради экономии горючего, что уменьшает эксплуатационные расходы, но увеличивает продолжительность рейса.

Планируется, что развитие проекта использования морских самоуправляемых судов будет двигаться в двух основных направлениях: на локальных участках — в прибрежных водах и на трансокеанских маршрутах. Конечно, при движении в портовых зонах, в пределах действия СУДС, в районах, ограничивающих возможность маневрирования, требуется квалифицированный судоводительский персонал, но на морских просторах такие суда могут перемещаться самостоятельно [1]. Экономическая заинтересованность в подобных перевозках заключается в сокращении расходов на заработную плату экипажа и увеличении грузоподъемности судна, кроме того прогнозируется рост в развитии РОВТ, в том числе в связи с проблемой пиратства, торговли людьми, наркотрафика. РОВТ могут использоваться при контроле шельфа, рыбоохране, там, где браконьерство имеет промышленные масштабы.

В результате проведенного исследования становится ясно, что, в основном, РОВТ, производимые в настоящее время мировой промышленностью, а также находящиеся на стадии экспериментальных испытаний, строятся на основе технологий удаленного доступа, другими словами — управление РОВТ осуществляет оператор. Такое решение подразумевает использование информационного канала с большой пропускной способностью. Учитывая теорему Шеннона – Хартли [14], наиболее подходящими диапазонами радиоволн для формирования подобного канала могут считаться ультракороткие волны. В соответствии с [15], этот термин также распространяется на все высокочастотные волны, вплоть до децимиллиметровых (совр. «терагерцовый» диапазон). К таким волнам относятся волны в пределах от 30 МГц до 3000 МГц. А, как известно [16], дальность распространения радиоволн указанного диапазона существенно ограничена. Соответственно, основным решением в подобной ситуации может считаться использование спутниковых каналов связи, однако в [17], в качестве дублирующей системы, может быть использована модернизированная РНС Loran-E (Long Range Navigation) и отечественная РНС «Чайка», которые являются высокоточными импульсно-фазовыми системами, с большой зоной действия. В [18] рассматривается новейшая отечественная низкоорбитальная космическая система персональной спутниковой связи и передачи данных «Гонец-1М». Данная система планируется как глобальная, но пока сплошное покрытие обеспечено, в основном, над территорией РФ. Однако данная система является перспективной, так как обладает возможностью быстрой передачи данных в большом объеме. Также развернута и работает в тестовом режиме система геостационарных спутниковых ретрансляторов «Луч», основные характеристики которой представлены в [19]. В [20] рассмотрены принципы построения спутниковых систем связи и составных частей уже действующих спутниковых систем с возможностью передачи данных в больших объемах.

Существует потенциальная возможность нарушения режима удаленного доступа, обусловленного, например, воздействием на информационный канал помех различной этимологии или отказом приемопередающего оборудования, используемого для формирования такого канала. Для решения данной проблемы, как уже упоминалось, необходимо предусмотреть возможность дублирования информационных каналов как минимум двумя независимыми системами связи. В частности, для районов, не сильно удаленных от берега, можно рассмотреть использование как спутниковых, так и береговых дифференциальных подсистем ГЛОНАСС/GPS [21], осуществляющих мониторинг и дистанционное управление РОВТ. Особое место в решении указанной проблемы занимают вопросы комплексирования инфокоммуникационных технологий. Первые шаги такого комплексирования были сделаны на водном транспорте при внедрении СОЭНКИ. Достаточно подробно этот вопрос рассмотрен в [22]. Кроме того, учитывая [23], стоит отметить, что тенденции развития на водном транспорте современных инфокоммуникационных технологий должно быть учтено при проектировании систем для РОВТ.

Как отмечено в [23], основой или «ядром» инфокоммуникационной системы водного транспорта является АСУДС, призванная [24] автоматизировать процессы управления движением судов, управлять информационными каналами в автоматическом режиме и обеспечивать мониторинг всей навигационной обстановки. В [25] описана топологическая структура АСУДС, в которую входят различного рода подсистемы, надежно связанные каналами связи. Соответственно, чем больше каналов связи и чем больше поток передаваемых через них информации, тем острее встаёт вопрос об электромагнитной защищенности и совместимости. В [26] представлена модель многоуровневой защищенности для каналов УКВ-диапазона, в [27] представлены условия использования сетей спутниковой связи.

Одним из основных условий успешного использования РОВТ является наличие сплошного, высокоточного поля дифференциальных поправок, и чем выше будет точность место определения, тем реальнее будет использование РОВТ. Так, в [28] описан опытный эксперимент, выполненный сотрудниками Московского государственного университета геодезии и картографии с помощью специального оборудования для определения точных координат стоячих и движущихся объектов по спутниковым системам навигации с использованием дифференциального режима. Результаты показали сантиметровую точность даже для движущихся объектов, что делает использование РОВТ реальным. В [29] представлено техническое описание используемого метода.

Помимо высокой точности определения по дифференциальным подсистемам, необходимо иметь целостное поле. В связи с этим необходимо вести постоянный мониторинг состояния дифференциального поля. В [30] представлены предложения, которые позволяют сформировать систему управления и контроля высокоточным дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС.

Рассмотренные основные аспекты использования современных инфокоммуникационных технологий для обеспечения беспилотного судовождения на водном транспорте позволяют сделать следующие выводы.

1. Перспектива внедрения РОВТ в общехозяйственную деятельность Российской Федерации позволит оптимизировать экипаж на борту РОВТ и обеспечит полную страховку от столкновений с другими участниками транспортного процесса, а также надводными и подводными опасностями. Идея о полуавтономных судах существует уже не первый десяток лет. Следует отметить, что лидерами в отрасли дистанционного управления подвижными объектами, по всей видимости, являются разработчики военно-промышленного комплекса. В настоящее время только несколько мировых компаний военно-промышленного комплекса предлагают подобные продукты.

2. В случае построения РОВТ на основе автономного принципа управления, проблемами, обусловленными необходимостью использования информационного канала, вероятно, можно будет пренебречь. Однако реализация указанного принципа в РОВТ в настоящее время практически не применима вследствие наличия ограничений, обусловленных текущим уровнем научно-технического прогресса. Тем не менее, реализация полуавтономного принципа управления РОВТ заслуживает более пристального внимания, нежели управление при помощи оператора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев А. И. «MARINET» – научный морской сегмент национальной технологической инициативы / А. И. Зайцев // Флотэксперт. — 2015. — № 6. — С. 14–15.
2. Littoral warfare // Naval forces. — 2005. — № 3. — Pp. 16–24.
3. Roboting.ru. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://roboting.ru/270-bespilotnyjj-boevoyjj-kater-protector.html> (дата обращения: 20.12.2015).
4. Defense aerospace. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://defense-aerospace.com/> (дата обращения: 20.12.2015).
5. Наука 21 век. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://nauka21vek.ru/archives/31985> (дата обращения: 22.12.2015).
6. Военное обозрение. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://topwar.ru/39448-korporaciya-iai-predstavila-bespilotnyy-kater-katana.html> (дата обращения: 20.12.2015).

7. New resume. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://newrezume.org/news/2014-05-29-3854> (дата обращения: 20.12.2015).
8. Военный обозреватель. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://warsonline.info/vmf/v-min-ske-proshli-ispitaniya-katera-bespilotnika.html> (дата обращения: 20.12.2015).
9. Яхта Adastra управляется с помощью iPad // Лоцман. Эксперт морской практики. — 2012. — № 2. — С. 11–11.
10. «Роллс-Ройс» предлагает создать самоуправляемые автоматические грузовые корабли: Земля. Хроники жизни. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://earth-chronicles.ru/news/2014-03-12-61292> (дата обращения: 20.12.2015).
11. Норвегия тестирует концепт судна для автономного каботажного плавания: Port news [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://portnews.ru/news/192613/> (дата обращения: 20.12.2015).
12. Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.unmanned-ship.org/munin/> (дата обращения: 20.12.2015).
13. Gigamir. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gigamir.net/news/pub233457> (дата обращения: 20.12.2015).
14. Зуев В. Ф. Радиотехника: учеб.-метод. пособие / В. Ф. Зуев, С. Ф. Шахнов. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2004. — 22 с.
15. ГОСТ 24375-80. Радиосвязь. Термины и определения. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: docs.nevacert.ru/files/gost/gost_24375-1980.pdf (дата обращения 21.12.2015).
16. Каретников В. В. Архитектура зон действия локальных дифференциальных подсистем, работающих для нужд внутреннего водного транспорта / В. В. Каретников. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. — 178 с.
17. Басс В. И. Современное состояние и перспективы развития Российской радионавигационной системы «Чайка» и объединенных радионавигационных цепей «Чайка / Лоран-С». / В. И. Басс, П. Э. Ефремов, С. П. Зарубин, В. М. Царев // Новости навигации. — 2008. — № 1. — С. 28–31.
18. Галькевич А. И. Низкоорбитальная космическая система спутниковой связи, и передача данных / А. И. Галькевич. — Тамбов: Изд-во «Юлис», 2011. — 169 с.
19. Система ретрансляции «Луч»: спутниковая система «Гонец». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gonets.ru/rus/sistemy-sputnikovoiy-svyazi/sistema-retranslyacii-luch/> (дата обращения: 21.12.2015).
20. Сомов А. М. Спутниковые системы связи: учеб. пособие / А. М. Сомов, С. Ф. Корнев. — М.: Горячая линия-Телеком, 2012. — 244 с.
21. Каретников В. В. Архитектура зон действия локальных дифференциальных подсистем, работающих для нужд внутреннего водного транспорта / В. В. Каретников. — СПб.: Изд-во СПГПУ, 2010. — 184 с.
22. Каретников В. В. Перспективы комплексирования речных инфокоммуникационных технологий для повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 2 (67). — С. 49–53.
23. Каретников В. В. Развитие и перспективы современных инфокоммуникационных систем для обеспечения судоходства на внутренних водных путях России / В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2010. — № 4. — С. 74–77.
24. Вишневский Ю. Г. Поля поражения сигналов, и электромагнитная защищенность информационных каналов в АСУДС / Ю. Г. Вишневский, А. А. Сикарев. — СПб.: Судостроение, 2006. — 356 с.
25. Пащенко И. В. Математическое обеспечение многоуровневой защищенности информационных каналов автоматизированных систем управления движением судов на ВВП. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2005. — 207 с.
26. Вишневский Ю. Г. Обеспечение электромагнитной защищенности протоколов физического, канального и сетевого уровней семиуровневой эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМ ВОС) УКВ-радиосвязи / Ю. Г. Вишневский, И. В. Пащенко // Межвуз. сб. науч. тр. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2004. — № 5. — С. 59–63.
27. Вишневский Ю. Г. Условия использования информационных сетей спутниковой связи в АСУДС на ВВП РФ / Ю. Г. Вишневский, И. В. Пащенко // Материалы МНТК «Транском-2004». — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2004. — С. 200–201.
28. Куприянов А. О. Экспериментальная оценка эффективности применения режима кинематики в реальном времени для решения навигационно-геодезических задач / А. О. Куприянов, А. М. Климовский // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2012. — № 1. — С. 3–10.

29. Standard R. 10403.1 for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services. Version 3. — Radio Technical Commission for Maritime Services, 2006.

30. Каретников В. В. К вопросу построения автоматизированной системы мониторинга параметров высокоточного навигационного поля / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов, И. Г. Кузнецов // Морская радиоэлектроника. — 2015. — № 2 (52). — С. 24–27.

HIGHLIGHTS OF USE MODERN INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES TO PROVIDE UNMANNED NAVIGATION ON WATER TRANSPORT

At present, the international transport policy is aimed at developing and implementing a new model of flow control vessels, which leads to an increase in the level of safety of navigation. In a place so the search for financial preferences makes ship owners explore ways of innovative development of industry that will find a non-standard systematic approach that takes into account modern network, spatial integrating subsystems and technologies. In this format, the prevailing stage of development beyond the National Technical Initiative (NTI) -program action to build a fundamentally are new markets and the creation of conditions for global technological leadership in Russia, including the creation of robotic water transport facilities operating on the principle of unmanned navigation. Principles of unmanned operation in various modes of transport has already been partially implemented, and work in a test mode. There are several approaches to this problem: it is the creation of robotic facilities, with varying degrees of autonomy and the use of information and communication technologies to provide various kinds of remote influence on these objects. In solving these problems, you must consider a number of scientific and technical issues and problems, some of which are discussed in this article.

Keywords: automated control system (ACS), control and correction stations (CCF), a differential field, safety of navigation, robotic object water transport (Rovt) unmanned navigation.

REFERENCES

1. Zaitsev, A. I. “MARINET” – nauchnyj morskoy segment nacional’noj tehnologicheskoy iniciativy.” *Flotjeksport* 6 (2015): 14–15.
2. “Littoral warfare.” *Naval forces* 3 (2005): 16–24.
3. Roboting.ru. Web. 20 Dec. 2015 <<http://roboting.ru/270-bespilotnyjj-boevoj-kater-protector.html>>.
4. Defense aerospace. Web. 20 Dec. 2015 <<http://defense-aerospace.com>>.
5. Science 21st Century. Web. 22 Dec. 2015 <<http://nauka21vek.ru/archives/31985>>.
6. Military Review. Web. 20 Dec. 2015 <<http://topwar.ru/39448-korporaciya-iai-predstavila-bespilotnyy-kater-katana.html>>.
7. New resume. Web. 20 Dec. 2015 <<http://newrezume.org/news/2014-05-29-3854>>.
8. Military Observer. Web. 22 Dec. 2015 <<http://warsonline.info/vmf/v-minske-proshli-ispitaniya-katera-bespilotnika.html>>.
9. “Yakhta Adastra upravlyayetsya s pomoshch’yu iPad.” *Lotsman. Ekspert morskoy praktiki* 2 (2012): 11–11.
10. “Rolls-Royce” predlagayet sozdat samoupravlyayemyye avtomaticheskiye gruzovyye korabli. Web. 20 Dec. 2015 <<http://earth-chronicles.ru/news/2014-03-12-61292>>.
11. Norvegiya testiruyet kontsept sudna dlya avtonomnogo kabotazhnogo plavaniya: Port news. Web. 20 Dec. 2015. <<http://portnews.ru/news/192613/>>.
12. Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks. Web. 20 Dec. 2015. <<http://www.unmanned-ship.org/munin/>>.
13. Gigamir. Web. 20 Dec. 2015. <<http://gigamir.net/news/pub233457>>.
14. Zuyev, V. F., and S. F. Shakhnov. *Radiotekhnika: uchebno-metodicheskoye posobiye*. SPb.: SPbGUVK, 2004.
15. GOST 24375-80. Radio. Terms and Definitions.
16. Karetnikov, V.V. *Architecture coverage areas of local differential subsystems working for the needs of inland waterway transport*. SPb.: Publishing house of the Polytechnic University, 2010.
17. Bass, V. I., P. Ye. Yefremov, S. P. Zarubin, and V. M. Tsarev. “Current state and prospects of development of the Russian radio navigation system “The Seagull” and combined navigation chains “Seagull / Loran-C”.” *Novosti navigatsii* 1 (2008): 28–31.

18. Galkevich, A.I. *Nizkoorbitalnaya kosmicheskaya sistema sputnikovoy svyazi, i peredacha dannykh*. Tambov: OOO Publishing Julis, 2011.
19. Sistema retranslyatsii "Luch": Gonets sputnikovaya sistema. Web. 21 Dec. 2015. <<http://gonets.ru/rus/sistemy-sputnikovoy-svyazi/sistema-retranslyatsii-luch/>>.
20. Somov, A. M., and S. F. Kornev. *Sputnikovyte sistemy svyazi. Uchebnoe posobie*. M.: Gorjachaja linija-Telekom, 2012.
21. Karetnikov, V. V. *Arkhitektura zon deystviya lokalnykh differentsialnykh podsystem, rabotayushchikh dlya nuzhd vnutrennego vodnogo transporta*. SPb.: SPGPU, 2010.
22. Karetnikov, V. V., and V. A. Bekryashev. "Perspectives of complexing river infocommunicational technologies for increasing navigational safety on inland water ways." *River transport (XXI century)* 2.67 (2014): 49–53.
23. Karetnikov, V. V., and A. A. Sikarev. "Development and prospects of modern communicational systems to facilitate shipping on the inland waterways of Russia." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikacij* 4 (2010): 74–77.
24. Vishnevskij, Ju. G., and A. A. Sikarev. "Polja porazheniya signalov, i jelektromagnitnaja zashhishhennost' informacionnykh kanalov v ASUDS". SPb.: Sudostroenie, 2006
25. Pashchenko, I.V. "Software of the multi-level protection of information channels of automated systems for traffic management in the GDP." Sankt Peterburg: SPGUVK, 2005.
26. Vishnevskij, Ju. G., and I. V. Pashhenko. "Obespechenie jelektromagnitnoj zashhishhennosti protokolov fizicheskogo, kanalnogo i setevogo urovnej semiurovnevoj jetalonnoj modeli vzaimodejstviya otkrytykh sistem (JeM VOS) UKV-radiosvyazi." *Mezhvuz. Sb. nauch. Trudov*. Vol. 5. SPb.: SPGUVK, 2004: 59–63.
27. Vishnevsky, J.G., and I. V. Pashchenko. "Usloviya ispolzovaniya informacionnykh setej sputnikovoy svyazi v ASUDS na VVP RF." *Materialy MNTK "Transkom-2004"*. SPb.: SPGUVK, 2004.
28. Kuprijanov, A. O., and A. M. Klimovskij. "Jeksperimentalnaja ocenka jeffektivnosti primenenija rezhima kinematiki v realnom vremeni dlja reshenija navigacionno-geodezicheskikh zadach." *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Geodeziya i aerofotosemka* 1 (2012): 3–10.
29. Standard R. 10403.1 for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services. Version 3. Radio Technical Commission for Maritime Services, 2006.
30. Karetnikov, V. V., I. V. Pashhenko, A. I. Sokolov, and I. G. Kuznecov. "On the construction of automated monitoring system parameters precision navigation field." *Marine Radio-electronics* 2.52 (2015) 24–27.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О.Макарова»
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Пащенко Иван Владимирович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О.Макарова»
ivanpashchenko@rambler.ru, kaf_tss@gumrf.ru
Зайцев Алексей Иванович —
кандидат технических наук,
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О.Макарова»
zaliv@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Karetnikov Vladimir Vladimirovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Pashchenko Ivan Vladimirovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
ivanpashchenko@rambler.ru
Zaytsev Alexey Ivanovich —
PhD, Senior Lecturer.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
zaliv@bk.ru

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2015 г.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 621.396

**В. В. Сахаров,
А. А. Чертков,
А. А. Дмитриев**

АЛГОРИТМ ТРАФИКА ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ МИНИМУМА ТРАНСПОРТНОЙ РАБОТЫ

В условиях экономических реформ существенно возрастает роль эффективного управления транспортными системами. Основной проблемой, возникающей при моделировании транспортных сетей, является разработка моделей, адекватных системам с применением методов дискретной комбинаторной оптимизации, которые должны быть гибкими в отношении выполняемых задач, быстро и с малыми затратами времени и ресурсов адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям работы системы. С целью повышения эффективности и качества функционирования логистической системы, предлагается производить анализ и синтез сети со сложной топологией методами компьютерного моделирования с применением в качестве средства решения ориентированного графа, по которому определяется критический путь как наиболее эффективный для достижения заданного критерия качества. Для получения оптимальных решений предлагаются вычислительный алгоритм и процедура оптимизации, позволяющие сократить время, необходимое для перемещения грузопотока из исходного в конечный пункт, согласно критерию качества, за счет сокращения маршрутов следования потоков грузов по звеньям транспортной сети. Эффективность применения алгоритма демонстрируется на конкретном примере.

Ключевые слова: рекурсивный алгоритм, взвешенный граф, матрица сети, кратчайший путь, трафик, транспортная работа, оптимизация, критерий качества.



УПРАВЛЕНИЕ транспортными системами, совершенствование их трафика, поиск технических, технологических и организационных решений, способствующих обеспечению их функционирования на качественно новом уровне, связано с решением класса потоковых задач различной сложности [1] – [3]. Важным механизмом совершенствования трафика перевозки грузов с позиций системности является комплекс наиболее эффективных научно-обоснованных решений в данной предметной области, получаемых методами моделирования и алгоритмизации с применением инструментария вычислительных сред и компьютерных технологий соответствующего назначения для адаптации управления трафиком к изменяющимся условиям функционирования транспортной системы.

Одним из направлений поиска путей повышения эксплуатационных показателей и качества систем трафика перевозки грузов является эффективное использование моделей и методов исследования операций, а также арсенала математического инструментария, содержащегося в мощных вычислительных средах, для проведения компьютерного эксперимента, позволяющего без существенных материальных затрат эффективно управлять материальными и финансовыми потоками в автоматизированных транспортных сетях.

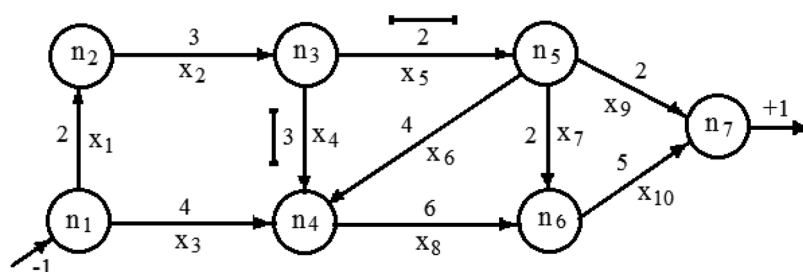
Отметим, что комплекс практических задач управления потоками в сетях различного назначения: транспортных, коммуникационных и связи, энергетических, логистических, гидравлических и др., может быть решен на основе общей теории систем, с использованием принципа наименьшего действия, моделей и методов дискретной комбинаторной оптимизации, адекватных реальным процессам. Актуальность решения задач данной проблематики подтверждается усилением требований к менеджменту качества и обоснованности принимаемых решений по организации и управлению производством с учетом динамики соответствующих секторов рынка [4] – [6].

В работе приводятся результаты исследований авторов, связанные с моделированием и алгоритмизацией трафика перевозки грузов по сети на заданном временном интервале и определением наиболее эффективных вариантов перевозок в условиях ограничений. Алгоритмом предусматривается двухэтапное решение. На первом этапе определяются наикратчайшие пути доставки грузов из пунктов отправления в пункты назначения. При введении ограничений схемы доставки грузов по сети генерируются на допустимом множестве комбинаций трафика. Ограничения задаются путем фиксации критерия в интервале от минимума до максимума. На втором этапе моделируется процесс доставки грузов с учетом имеющихся запасов в каждом пункте отправления (предложения на рынке) и требуемого количества грузов в пунктах назначения (спроса потребителей на рынке). Поиск наилучшего варианта доставки осуществляется по производственной матрице маршрутизации грузов методом линейного программирования. Алгоритмом реализации трафика предусматривается расчет объемов следования грузов по каждой ветви транспортной сети и введение требуемых ограничений с учетом пропускной способности элементов сети.

При транспортировке однородных грузов с одинаковыми удельными экономическими показателями модель предлагает выбор маршрутов доставки, соответствующих минимуму суммарной транспортной работы, традиционно измеряемой на водном транспорте как произведение объема перевозок на расстояние доставки. В иных случаях критерий качества будет соответствовать другому интегральному показателю в выбранных единицах измерения, необходимых для управления ресурсами.

Поскольку многие потоковые задачи являются многокритериальными, существенно усложняется поиск оптимальных решений, основанных, как правило, на принятии некоторых компромиссных оценок, которые, вообще говоря, могут не отвечать оптимуму ни по одному из критериев. Кроме того, часто приходится принимать во внимание нелинейный характер ряда эксплуатационных показателей сети и параметров ее модели, которые оцениваются методами параметрической и структурной идентификации по эксперименту. Модели, методы идентификации и оценки в сочетании с операциями фильтрации, выполняемыми с помощью фильтров Калмана — Бьюси, различных аналоговых и цифровых фильтров, вейвлет-преобразований и традиционных способов анализа сигналов, основанных на свойствах ортогональных рядов, являются рабочим механизмом гарантированного обеспечения адекватности модели и сети в реальных условиях функционирования.

Вычислительный алгоритм. Пусть некоторая транспортная сеть задана в виде взвешенного графа, приведенного на рисунке, где каждой дуге (ребру) соответствует определенное расстояние. Необходимо найти кратчайший путь для перевозки грузов из i -го узла транспортной сети в заданный j -й узел [7].



Расчетная схема транспортной сети

При построении модели и вычислительного алгоритма в сети с заданной топологией сначала выбираются узлы (порты отправления и назначения). Затем определяется целевая функция, вводятся ограничения в форме матричных уравнений — равенств и неравенств, устанавливаются требуемые нижняя и верхняя границы вектора переменных состояния, размерность которого равна числу дуг графа. Согласно процедуре вычислительного алгоритма, элементы вектора, соответ-

ствующие нижней границе, не должны принимать отрицательных значений. Для выполнения вычислительных операций на первом этапе в структуре алгоритма предусматривается обращение к функции линейного программирования `bintprog` инструментария Optimization Toolbox вычислительной среды MatLAB [8] – [10]. На втором этапе для решения задачи о назначениях используется функция `linprog` [11] – [12]. Подготовка данных и ввод информации осуществляются при соблюдении синтаксиса функций. Поиск минимума транспортной работы на маршрутах, содержащих дуги (ребра) с двумя направлениями, выполняется в цикле, представляющем все возможные варианты, определяемые с использованием булевых функций, из которых выбираются наиболее подходящие решения. В отличие от существующих алгоритмов, в предлагаемом алгоритме ограничения трафика назначаются заданием численных значений критерия качества, которые получаются на первом этапе для всех допустимых режимов работы сети. В исследовании операций к классу задач планирования трафика с выбором кратчайшего пути часто относят также задачи о замене оборудования, планировании выполнения работ, размещения предприятий и объектов инфраструктуры, планировании производства и др.

Известно, что наиболее распространенные и используемые на практике модели и алгоритмы решения задач о кратчайшем пути, такие как алгоритм Беллмана — Форда, алгоритм Дейкстры и др., строятся на основе пошаговых процедур динамической оптимизации [4] – [7], сложность которых возрастает в степени 2^n , где n — количество вершин в графе. Указанные обстоятельства, а также значительно возросшие технические возможности современных вычислительных сред, в том числе среды MatLAB, позволили авторам статьи получить оптимальные решения данной задачи с помощью инструментария целочисленного (бинарного) программирования. Для построения сетевой модели и алгоритма в работе используется математический аппарат дискретного программирования, в котором искомые переменные принимают только целочисленные или логические (булевы или бинарные) значения — нуль или единицу [10].

Построим без потери общности математическую модель и алгоритм применительно к транспортной сети (см. рисунок), представленной в виде взвешенного неориентированного графа. Граф состоит из семи узлов (вершин) и десяти дуг (ребер). Определим критический путь от узла № 1 к узлу № 7. Численные значения ребер (дуг) взвешенного графа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица весов ребер исходного графа

	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7
n_1	Исток	$x_1=2$		$x_3=4$			
n_2			$x_2=3$				
n_3				$x_4=3$	$x_5=2$		
n_4			$x_4=3$			$x_8=6$	
n_5			$x_5=2$	$x_6=4$		$x_7=2$	$x_9=2$
n_6				$x_8=6$			$x_{10}=5$
n_7							Сток

Заполним матрицу инцидентий, используя следующее правило: каждый ее элемент S_{ij} , соответствующий n_i -й строке и n_j -му столбцу, равен:

$$S_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } x_j\text{-я дуга не инцидентна вершине } n_i; \\ -1, & \text{если } x_j\text{-я дуга инцидентна } n_i\text{-й вершине и исходит из нее;} \\ +1, & \text{если } x_j\text{-я дуга инцидентна } n_i\text{-й вершине и входит в нее.} \end{cases}$$

Используя это правило, образуем матрицу инцидентий и представим ее в форме, удобной для выполнения дальнейших расчетов. Полученная матрица для ориентированного графа (см. рисунок) имеет следующий вид:

$$S = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} \\ \begin{matrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Найдем кратчайшие пути от вершины x_1 до всех остальных вершин. С этой целью используем аппарат математического программирования для исследования линейной модели с вектором состояния x , содержащим бинарные переменные с индексами дуг:

$$x = [x_{12} \ x_{14} \ x_{23} \ x_{34} \ x_{35} \ x_{46} \ x_{54} \ x_{56} \ x_{57} \ x_{67}]^T$$

и целевой функцией

$$J = \min_x (fx), \quad (1)$$

где f — вектор-строка с «весовыми» коэффициентами:

$$f = [2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 2 \ 4 \ 2 \ 6 \ 2 \ 5].$$

Минимизацию (1) выполним при соблюдении линейных ограничений-равенств, представленных в матричной форме. Ограничения составим по уравнениям баланса потоков в каждом узле транспортной сети:

$$\text{или} \quad Sx = B, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot x = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

где вектор B в модели (2) определяется из условий баланса потоков в соответствующих узлах графа. При следующих принятых обозначениях направлений потоков:

- для узла-источника — «Выход – Вход» = -1;
- для промежуточных узлов — «Выход – Вход» = 0;
- для узла-стока — «Выход – Вход» = +1;
- все неизвестные — неотрицательные переменные.

В общем случае, при различных направлениях трафика грузов по транспортной сети отдельные ребра графа могут иметь разные направления (как прямое, так и обратное). Такими ребрами, как следует из расчетной схемы (см. рисунок с. 181), являются ребра x_{34} , x_{35} . Эти пути помечены на рисунке линиями сверху. При составлении вычислительного алгоритма и реализации процедуры минимизации функции цели для них были выбраны четыре варианта ориентирования (табл. 2), определяемые двумя бинарными переменными.

Таблица 2

Варианты ориентирования ребер x_{34} , x_{35}

Номер варианта	Вершина n_3		Вершина n_4	
	Ребро x_4	Ребро x_5	Ребро x_4	Ребро x_5
1	-1	-1	1	1
2	1	-1	-1	1
3	1	1	-1	-1
4	-1	1	1	-1

Требуется среди множества решений системы уравнений (2) найти такой неотрицательный результат, который составляет минимум целевой функции (1).

Реализация в среде MatLAB. Для решения задачи дискретного (целочисленного) программирования) вида

$$J = \min_x (f \cdot x)$$

в среде MatLAB (*License Attributes: version R2010b, license number:358625*) воспользуемся функцией

$$[x,J]=bintprog(f,A,b,Aeq,beq),$$

где f , b и beq — вектора; A и Aeq — матрицы; x — целочисленный вектор состояния, компоненты которого принимают значения 0 или 1; J — целевая функция (критерий качества).

Область поиска J путем вариации x ограничена следующими условиями [8]:

- $A \cdot x \leq b$ — линейные ограничения типа неравенств;
- $Aeq \cdot x = beq$ — линейные ограничения типа равенств.

Для обращения к функции `bintprog` подготовим входную информацию:

- вектор весовых коэффициентов целевой функции f (приведен ранее);
- матрица коэффициентов системы ограничений-равенств, составленная по уравнениям баланса (матрица инцидентий):

$Aeq=[-1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; 1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ a(1)*(-1) \ a(2)*(-1) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ a(1)*1 \ 0 \ 1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a(2)*1;$

$-1 \ -1 \ 0 \ -1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ -1; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1],$

где $a(1)$, $a(2)$ — элементы матрицы;

$As=[1 \ 1;-1 \ 1;-1 \ -1;1 \ -1],$

с помощью которой выбирается требуемый вариант ориентации ребер;

- вектор свободных (правых) членов системы уравнений (2) — ограничений-равенств, составленных по уравнениям баланса:

$beq=[-100000001]'$,

где только одно значение -1 (узел начала маршрута) и только одно значение $+1$ (узел завершения маршрута).

На первом этапе найдем минимум критерия качества с помощью функции `bintprog`, согласно ее синтаксису.

В отличие от известных алгоритмов, разработанный вычислительный алгоритм, реализованный в кодах MatLAB, позволяет получить наикратчайшие расстояния J_{ij} между любыми парами вершин n_i, n_j в диапазоне от J_{12} до J_{67} . Расчетные значения, полученные для выбранных направлений трафика перевозки грузов по сети (см. рисунок с. 181), приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения наикратчайших расстояний трафика перевозки грузов

Начало	Окончание	Наикратчайший путь	Расстояния
n_1	n_6	$S=[x1 \ x2 \ x5 \ x7]=[1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$	$J_{16}=9$
n_1	n_7	$S=[x1 \ x2 \ x5 \ x9]=[1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$	$J_{17}=9$
n_2	n_6	$S=[x2 \ x5 \ x7]=[0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$	$J_{26}=7$
n_2	n_7	$S=[x2 \ x5 \ x9]=[0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$	$J_{27}=7$
n_3	n_6	$S=[x5 \ x7]=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$	$J_{36}=4$
n_3	n_7	$S=[x5 \ x9]=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$	$J_{37}=4$
n_4	n_6	$S=[x8]=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$	$J_{46}=6$
n_4	n_7	$S=[x4 \ x5 \ x9]=[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$	$J_{47}=7$

На втором этапе с помощью алгоритма решается задача распределения грузов, содержащихся в пунктах отправления (узлы n_1, n_3, n_4), по потребителям (пунктам назначения), расположенным в узлах n_6 и n_7 . Решения основаны на данных, приведенных в табл. 3.

Рассматривается процесс полной доставки грузов в пункты назначения при отсутствии накопителей на пути их следования. Расчеты выполняются на основе производственной матрицы, приведенной в табл. 4, где в 1-й графе указаны узлы отправления грузов, во 2-й графе — узлы приема (назначения) грузов, а в 3-й графе — объемы поставок.

Таблица 4

Производственная матрица плана перевозок грузов по сети

Узлы отправления грузов	Узлы приема грузов		Объемы поставок, т
	n_6	n_7	
n_1	9	9	60
n_3	4	4	30
n_4	6	7	10
Объемы потребления	20	80	

Видно, что весовыми коэффициентами производственной матрицы являются данные, представляющие собой минимальные расстояния между соответствующими узлами отправления и приема грузов, приведенные в 4-й графе табл. 3.

Объемы поставок приведены в 4-й графе табл. 4, а объемы потребления — в последней строке этой таблицы. Полученные данные соответствуют условиям задачи трафика по сети с топологией, приведенной на рисунке.

Определение плана перевозок по оптимальным маршрутам транспортной сети выполним с помощью линейного программирования. Цель планирования состоит в минимизации транспортной работы по алгоритму трафика.

Введем вектор состояния y , элементами которого являются объемы перевозок между узлами отправления и приема грузов (см. табл. 4) с аналогичной индексацией:

$$y = [y_{16} \ y_{17} \ y_{36} \ y_{37} \ y_{46} \ y_{47}]^T.$$

Подготовим данные для использования функции `linprog` инструментария Optimization Toolbox. Согласно синтаксису функции, на основании производственной матрицы (см. табл. 4) получим

$$f1 = [9 \ 9 \ 4 \ 4 \ 6 \ 7].$$

При отсутствии ограничений-неравенств численные значения $A1, b1$ приравняем к «пустым» матрицам. Ограничения-равенства представим выражениями:

$$A1eq = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad b1eq = [60 \ 30 \ 10 \ 20 \ 80]^T.$$

Введем ограничения на переменные состояния: нижняя граница $lb1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, верхняя граница $ub1 = []$. Тогда вычисления с использованием функции `linprog` приводят к следующему результату:

$$y_{opt} = [7.1551 \ 52.8449 \ 2.8449 \ 27.1551 \ 10.0000 \ 0.0000]^T.$$

Объем минимальной транспортной работы, при условии, что расстояния измеряются в километрах, а перевозимые грузы в — тоннах, составляет

$$J1=720 \text{ т·км.}$$

Загрузку звеньев сети, соответствующую расчетному режиму, согласно алгоритму, представим в виде вектора:

$$x_{\text{opt}} = [x_{12} \ x_{14} \ x_{23} \ x_{34} \ x_{35} \ x_{46} \ x_{54} \ x_{56} \ x_{57} \ x_{67}]^T = [60 \ 60 \ 0 \ 0 \ 90 \ 0 \ 10 \ 10 \ 80 \ 0]^T.$$

Анализ результатов. На основе разработанного алгоритма получены решения, сведенные в табл. 5.

Таблица 5

План перевозок по оптимальным маршрутам транспортной сети

Узлы отправления грузов	Узлы приема грузов		Объемы поставок
	n_6	n_7	
n_1	$y_{16} = 7.1551$	$y_{17} = 52.8449$	60
n_3	$y_{36} = 2.8449$	$y_{37} = 27.1551$	30
n_4	$y_{46} = 10.0000$	$y_{47} = 0.0000$	10
Объемы потребления	20	80	

Выводы

1. Разработан алгоритм трафика перевозки грузов в сетях с ограниченными ресурсами, основанный на экстремальных решениях, полученных методами исследования операций с использованием компьютерных вычислительных средств и способов количественной оценки принимаемых решений.

2. Предложена модель для выполнения технологических расчетов, представленная уравнениями функции цели и ограничениями в форме балансовых уравнений для каждого узла с учетом входных и выходных потоков в сетях при соответствующих ограничениях. Введены бинарные переменные состояния, что позволило фиксировать принадлежность каждой заданной операции (дуги) соответствующему критическому пути, используя для расчетов функции линейного программирования, содержащиеся в инструментарии Optimization Toolbox среды MatLAB.

3. Корректность и эффективность предложенных алгоритмических решений подтверждена конкретными примерами автоматизации оценки критического пути с полным анализом возможных вариантов, а также машинным экспериментом.

4. Приведенный алгоритм может быть использован не только для автоматизации и оптимизации логистических систем на водном транспорте, но и в телекоммуникационных системах пакетной передачи данных [14], в системах оптимизации маршрутных карт [13], а также в системах автоматизации и управления технологическими процессами высокой размерности различного назначения [15], [16].

5. Реализация управления трафиком по алгоритму, обеспечивающему минимум транспортной работы, предусматривает уменьшение потребления топлива на перевозки, что также определяет практическую ценность предлагаемых решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов А. Г. О некоторых подходах теории инвариантности к системам управления / А. Г. Андрианов, А. П. Курдюков. — М.: ИПУ РАН, 2015.—152 с.
2. Боженюк А. В. Подход к нахождению максимального потока в нечеткой транспортной сети / А. В. Боженюк, И. Н. Розенберг, Е. М. Рогущина // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2011. — № 5 (118). — С. 83–88.
3. Гузаиров М. Б. Моделирование транспортной сети поставок в строительной индустрии / М. Б. Гузаиров, В. А. Тарасова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2008. — Т. 10. — № 2. — С. 58–63.
4. Оре О. Теория графов / О. Оре. — М.: Изд-во: Либроком, 2009. — 354 с.

5. Бояринцева Т. И. Теория графов: методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Дискретная математика» / Т. И. Бояринцева, А. А. Мاستихина. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 40 с.

6. Рассел Д. Диаграмма состояний (теория автоматов) / Д. Рассел. — Изд-во: VSD, 2012. — 96 с.

7. Харари Ф. Теория графов. — Изд. 2-е / Ф. Харари. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 296 с.

8. Мироновский Л. А. Введение в MATLAB: учеб. пособие / Л. А. Мироновский, К. Ю. Петрова. — СПб.: СПбГУАП, 2005. — 122 с.

9. 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.

10. Заринова Э. Р. Дискретная математика: в 3 ч. — Ч. III. Теория графов / Э. Р. Заринова, М. Г. Кокотчикова. — М.: Изд-во РУДН, 2013. — 179 с.

11. D'Ambrosio C. Mathematical programming techniques in water network optimization / C. D'Ambrosio, A. Lodi, S. Wiese, C. Bragalli // European Journal of Operational Research. — 2015. — Vol. 243. — Is. 3. — Pp. 774–788. DOI:10.1016/j.ejor.2014.12.039.

12. Reich D. A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints / D. Reich // European Journal of Operational Research. — 2013. — Vol. 230. — Is. 3. — Pp. 487–494. DOI:10.1016/j.ejor.2013.04.049.

13. Bozhenyuk A. The method of the maximum flow determination in the transportation network in fuzzy conditions / A. Bozhenyuk, I. Rozenberg, E. Rogushina // Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies «IS&IT'11»: Scientific publications in 4 volumes. — М.: Physmathlit, 2011. — Vol. 4. — Pp. 17–24.

14. Dutta D. Multi-choice goal programming approaches for a fuzzy transportation problem / D. Dutta, A. S. Murthy // IJRRAS. — 2010. — Vol. 2 (2). — Pp. 132–139.

15. Kumar A. Generalized Simplex Algorithm to Solve Fuzzy Linear Programming Problems with Ranking of Generalized Fuzzy Numbers / A. Kumar, P. Singh, J. Kaur // TJFS: Turkish Journal of Fuzzy Systems. — 2010. — Vol. 1. — № 2. — Pp. 80–103.

16. Kumar A. Fuzzy Optimal Solution of Fully Fuzzy Linear Programming Problems with Inequality Constraints / A. Kumar, J. Kaur, P. Singh // International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences. — 2010. — Vol. 6. — Pp. 37–41.

ENSURING MINIMUM TRANSPORT WORK ALGORITHM FOR GOODS TRAFFIC

In economic reform context it has significantly increased the role of effective management of transport systems. The main problem in building effective models of transport networks is to develop adequate models and methods of discrete combinatorial optimization. They need to be more flexible with regard to tasks quickly and with a small investment of time and resources to adapt to the constantly changing demands on the system. With a view to enhancing the effectiveness and quality of the logistics system, we propose to produce analysis and synthesis of complex network topology using computer simulation methods as a means of solving a directed graph, determining critical path as the most effective for achieving the specified quality criteria. As a result of developed algorithm and optimization procedure to reduce the time required for the movement of traffic from the source to the destination, according to the criterion of quality. Example is considered to demonstrate the effectiveness of the algorithm.

Keywords: recursive algorithm, weighted graph, matrix network, shortest path, traffic, transport work, optimization, objective function.

REFERENCES

1. Andrianov, A. G., and A. P. Kurdjukov. *O nekotoryh podhodah teorii invariantnosti k sistemam upravleniya*. М.: IPU RAN, 2015.

2. Bozhenyuk, Alexander Vitalievich, Igor Naymovich Rozenberg, and Eugenia Michailovna Rogushina. "Approach of maximum flow determining for fuzzy transportation network." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 5(118) (2011): 83–88.

3. Guzairov, M. B., and V. A. Tarasova. "Modelirovanie transportnoj seti postavok v stroitelnoj industrii." *Vestnik UGATU* 10.2 (2008): 58–63.
4. Ore, O. *Teorija grafov*. Izdatelstvo: Librokom, 2009.
5. Bojarinceva, T. I., and A. A. Mastihina. *Teorija grafov: metodicheskie ukazaniya k vypolneniju domashnego zadaniya po kursu «Diskretnaja matematika»*. M.: MGTU im. N. Je. Baumana, 2014.
6. Russell, D. *Diagramma sostojanij (teorija avtomatov)*. Izd-vo: VSD, 2012.
7. Harari, F. *Teorija grafov. Izd. 2-e*. M.: Editorial URSS, 2003.
8. Mironovskij, L. A., and K. Ju. Petrova. *Vvedenie v MATLAB. Uchebnoe posobie*. SPb.: SPbGUAP, 2005.
9. Saharov, V. V., A. A. Chertkov, and D. S. Tormashev. "The algorithm of the optimal planning for group interaction of robots." *Morskoy Vestnik* 4 (2014): 119–122.
10. Zaripova, Je. R., and M. G. Kokotchikova. *Diskretnaja matematika. Chast III. Teorija grafov*. M.: Izd-vo RUDN, 2013.
11. D'Ambrosio, C., A. Lodi, S. Wiese, and C. Bragalli. "Mathematical programming techniques in water network optimization." *European Journal of Operational Research* 243.3 (2015): 774–788. DOI:10.1016/j.ejor.2014.12.039.
12. Reich, Daniel. "A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints." *European Journal of Operational Research* 230.3 (2013): 487–494. DOI:10.1016/j.ejor.2013.04.049.
13. Bozhenyuk, A., I. Rozenberg, and E. Rogushina. "The method of the maximum flow determination in the transportation network in fuzzy conditions." *Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies «IS&IT'11»: Scientific publications in 4 volumes*. Vol. 4. M.: Physmathlit, 2011: 17–24.
14. Dutta, D., and A. S. Murthy. "Multi-choice goal programming approaches for a fuzzy transportation problem." *IJRRAS* 2(2) (2010): 132–139.
15. Kumar, A., P. Singh, and J. Kaur. "Generalized Simplex Algorithm to Solve Fuzzy Linear Programming Problems with Ranking of Generalized Fuzzy Numbers." *TJFS: Turkish Journal of Fuzzy Systems* 1.2 (2010): 80–103.
16. Kumar, A., J. Kaur, and P. Singh. "Fuzzy Optimal Solution of Fully Fuzzy Linear Programming Problems with Inequality Constraints." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences* 6 (2010): 37–41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
saharov_@rambler.ru
Чертков Александр Александрович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
chertkov51@mail.ru
Дмитриев Александр Александрович — аспирант.
Научный руководитель:
Сахаров Владимир Васильевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_osnpr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov Vladimir Vasilevich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
saharov_@rambler.ru
Chertkov Alexandr Alexandrovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
chertkov51@mail.ru
Dmitriev Alexandr Alexandrovich — postgraduate.
Supervisor:
Saharov Vladimir Vasilevich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
kaf_osnpr@gumrf.ru

МОДЕЛЬ СУДОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ КАК КОНСТРУКТИВНО-ОРТОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ

Рассмотрен приближенный метод расчета судовых перекрытий, работающих на изгиб. В качестве расчетной схемы выбирается математическая модель в виде конструктивно-ортотропной плиты. Такой метод расчета перекрытий был предложен академиком Ю. А. Шиманским в 1934 г. и развит в дальнейшем П. Ф. Папковичем, А. А. Курдюмовым и В. А. Постновым. Расчет выполнен методом Бубнова – Галеркина с использованием в качестве базисных функций специально построенных ортонормированных полиномов. Приводится сравнение результатов расчета судового перекрытия по предлагаемой в данной работе модели и по модели, основанной на методе Навье уравнивания прогибов в перекрестных балках. Рассмотрен числовой пример расчета перекрытия с жестко зацементированными балками обоих направлений. Пример показывает хорошее согласование решений по двум моделям и эффективность использования системы аналитических вычислений Maple к расчету балочных перекрытий различного назначения.

Ключевые слова: плоское перекрытие, балка, уравнение изгиба пластины, метод Бубнова-Галеркина, ортонормированные полиномы.

Введение

Плоские перекрытия являются элементами многих судовых конструкций — палуб, переборок судна, днищ, бортов. С точки зрения расчетной схемы, судовое перекрытие представляет собой систему пересекающихся балок, жестко соединенных друг с другом в точках пересечения и прикрепленных к сплошному настилу. Предполагается, что такая система расположена в одной плоскости и закреплена каким-либо способом на опорном контуре. Судовое плоское перекрытие способно воспринимать поперечную нагрузку и нагрузку распора, действующую в плоскости перекрытия. Расчет судовых перекрытий, как и других сложных составных конструкций, в настоящее время выполняется численно методом конечных элементов.

С развитием вычислительной техники и специального программного обеспечения — систем символьных вычислений (Maple, Mathematica и др.), стало возможным решать сложные математические задачи аналитическими методами. Аналитический расчет судового перекрытия можно выполнить, используя различные математические модели. Обычно сплошное перекрытие заменяют балочной системой по определенным правилам [1]. При этом не учитывается наличие сплошного настила (пластины) [2] – [5]. Численно-аналитическое решение задачи о деформировании балочного перекрытия с использованием уравнений плоской задачи теории упругости выполнено в статье [6]. Аналитическими методами теперь решаются и другие сложные задачи теории упругости [7] – [13]. Отметим, что конструкции плоских перекрытий широко применяются в строительстве (промышленном, гражданском, гидротехническом). Это перекрытия различных помещений, конструкции плоских стальных затворов или створок ворот в гидротехнических сооружениях и судовых шлюзах.

Постановка задачи

В отличие от работ [1] и [6], здесь используется математическая модель перекрытия как конструктивно-ортотропной пластины [14]. В качестве расчетной схемы плоского судового перекрытия рассмотрим прямоугольную пластину, подкрепленную перекрестной системой ребер жесткости. При определенных условиях можно произвести замену ребристой пластины конструктивно-ортотропной пластиной с различными упругими свойствами по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Рассмотрим однородную ортотропную пластину постоянной толщины h . Будем предполагать, что пластина имеет в плане размеры $0 \leq x \leq a$, $0 \leq y \leq b$. В качестве срединной плоскости недеформированной пластины выберем плоскость xu , ось z направим вниз, как показано на рис. 1.

В качестве внешней нагрузки, действующей на пластину, будем рассматривать поперечную нагрузку интенсивности $q(x, y)$.

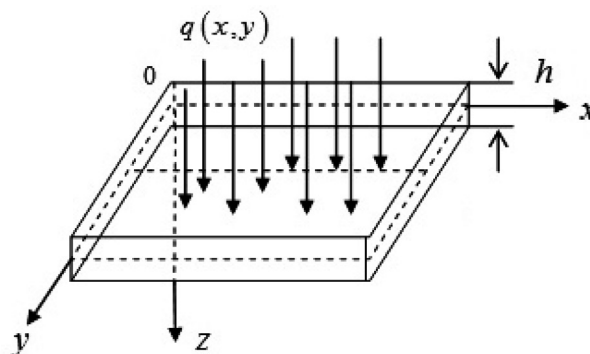


Рис. 1. Пластина постоянной толщины

Как известно [2], прогиб срединной поверхности $w(x, y)$ ортотропной пластины удовлетворяет уравнению

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y). \quad (1)$$

Для ортотропной пластины, когда направления осей x и y совмещены с главными направлениями упругости, имеем:

$$\nu_1 D_2 + 2D_k = \nu_2 D_1 + 2D_k = D_3;$$

$$D_1 = \frac{E_1 h^3}{12(1 - \nu_1 \nu_2)}, D_2 = \frac{E_2 h^3}{12(1 - \nu_1 \nu_2)}, D_k = \frac{G_{12} h^3}{12},$$

где D_1, D_2 , и D_k — изгибные и крутильная жесткости, или главные жесткости; E_1, E_2 , и G_{12} — модули упругости и сдвига для главных направлений. Для изотропной пластины $E_1 = E_2 = E$, $\nu_1 = \nu_2 = \nu$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}, G_{12} = G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Таким образом, задача сводится к определению функции нормального прогиба $w(x, y)$ из уравнения (1), которая должна удовлетворять некоторым граничным условиям.

Иногда приближенно принимают $D_3 = \sqrt{D_1 D_2}$. В этом случае дифференциальное уравнение изгиба (1) приводится к уравнению для изотропной пластины, если ввести новую переменную $y_1 = y \sqrt[4]{D_1/D_2}$:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q(x, y)}{D_1}.$$

Решение этого уравнения производится так же, как для условной изотропной пластины, у которой вместо ширины b принят размер $b_1 = b \sqrt[4]{D_1/D_2}$.

Рассмотрим теперь изотропную пластину, усиленную сеткой ребер, часто поставленных как в одном (вдоль оси x), так и в другом (вдоль оси y) направлениях. Такая система проявляет в общем случае различные жесткостные характеристики в направлениях x и y и называется конструктивно-ортотропной плитой. Ее расчет можно приближенно выполнить как расчет условной ортотропной плиты с жесткостями D_1, D_2 , и D_3 , входящими в уравнение (1).

Пусть для ребер, параллельных оси x , жесткость на изгиб EJ_1 , жесткость на кручение GJ_{kp1} , а шаг расстановки этих ребер b_1 . Соответственно для ребер, параллельных оси y , жесткости на изгиб и кручение EJ_2, GJ_{kp2} , а расстояние между этими ребрами a_1 . Тогда указанные жесткости ортотропной пластины будут:

$$D_1 = D + \frac{EJ_1}{b_1}; D_2 = D + \frac{EJ_2}{a_1}; D_3 = D + \frac{1}{2} \left[\frac{GJ_{kp1}}{b_1} + \frac{GJ_{kp2}}{a_1} \right],$$

где D — цилиндрическая жесткость самой изотропной пластины, которая усиливается ребрами.

При отсутствии пластины ($D = 0$) уравнение (1) будет приближенно описывать изгиб частой балочной клетки.

Метод Бубнова — Галеркина

Будем искать решение задачи в виде

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N W_{m,n} \varphi_m(x) \psi_n(y), \quad (2)$$

где $W_{m,n}$ — константы, а в качестве базисных функций $\{\varphi_m(x)\}$, $\{\psi_n(y)\}$, $m, n = 1, 2, 3 \dots$ выбираем специально построенные ортонормированные многочлены, которые подчиняются граничным условиям в точках $x = 0, x = a$ и $y = 0, y = b$.

Коэффициенты $W_{m,n}$ определяются с помощью стандартной процедуры метода Бубнова — Галеркина — невязка в выполнении уравнения (1) после подстановки (2) в (1) должна быть ортогональна базисным функциям. В результате приходим к следующей системе уравнений относительно констант $W_{m,n}$:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (D_1 B_{1,m,r} \delta_{n,s} + 2D_3 A_{1,m,r} A_{2,n,s} + D_2 B_{2,n,s} \delta_{m,r}) W_{m,n} = q_{r,s}, \quad r = 1, 2, \dots, M, \quad s = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} A_{1,m,n} &= \int_0^a \frac{d^2 \varphi_m(x)}{dx^2} \varphi_n(x) dx, \quad A_{2,m,n} = \int_0^b \frac{d^2 \psi_m(y)}{dy^2} \psi_n(y) dy; \\ B_{1,m,n} &= \int_0^a \frac{d^4 \varphi_m(x)}{dx^4} \varphi_n(x) dx, \quad B_{2,m,n} = \int_0^b \frac{d^4 \psi_m(y)}{dy^4} \psi_n(y) dy; \\ q_{m,n} &= \int_0^a \int_0^b q(x, y) \varphi_m(x) \psi_n(y) dx dy, \quad \delta_{m,n} = \begin{cases} 0, & m \neq n, \\ 1, & m = n. \end{cases} \end{aligned}$$

Ортонормированные многочлены, удовлетворяющие тем или иным граничным условиям, легко строятся в системе символьных вычислений Maple на основе системы $\{x^n\}$, $n = 0, 1, 2, 3 \dots$. Как известно [15], степени x образуют полную систему по отношению к классу функций, непрерывных в заданном промежутке. Для ортогонализации указанной системы используем стандартную процедуру Грамма — Шмидта.

Не останавливаясь на очевидных подробностях, приведем несколько первых полиномов ортонормированной на отрезке $[0, L]$ системы, удовлетворяющей граничным условиям жесткого защемления (функция и ее первая производная обращаются в нуль на концах промежутка)

$$\begin{aligned} f_1(\xi) &= \frac{1}{28} \frac{\sqrt{17290}}{\sqrt{L^5}} \xi^2 - \frac{2}{7} \frac{\sqrt{17290}}{L^7 \sqrt{L^5}} \xi^9 + \frac{1}{4} \frac{\sqrt{17290}}{L^8 \sqrt{L^5}} \xi^{10}; \\ f_2(\xi) &= -\frac{199}{1484} \frac{L \sqrt{48230}}{\sqrt{L^7}} \xi^2 + \frac{12}{53} \frac{\sqrt{48230}}{\sqrt{L^7}} \xi^3 - \frac{190}{371} \frac{\sqrt{48230}}{L^6 \sqrt{L^7}} \xi^9 + \frac{89}{212} \frac{\sqrt{48230}}{L^7 \sqrt{L^7}} \xi^{10}; \\ f_3(\xi) &= \frac{7821}{90524} \frac{L^2 \sqrt{1471015}}{\sqrt{L^9}} \xi^2 - \frac{1122}{3233} \frac{L \sqrt{1471015}}{\sqrt{L^9}} \xi^3 + \frac{21}{61} \frac{\sqrt{1471015}}{\sqrt{L^9}} \xi^4 - \\ &\quad - \frac{7410}{22631} \frac{\sqrt{1471015}}{L^5 \sqrt{L^9}} \xi^9 + \frac{3153}{12932} \frac{\sqrt{1471015}}{L^6 \sqrt{L^9}} \xi^{10}; \end{aligned}$$

$$f_4(\xi) = -\frac{3877}{48068} \frac{L^3 \sqrt{12029017}}{\sqrt{L^{11}}} \xi^2 + \frac{6774}{12017} \frac{L^2 \sqrt{12029017}}{\sqrt{L^{11}}} \xi^3 - \frac{15351}{12017} \frac{L \sqrt{12029017}}{\sqrt{L^{11}}} \xi^4 + \\ + \frac{192}{197} \frac{\sqrt{12029017}}{\sqrt{L^{11}}} \xi^5 - \frac{6118}{12017} \frac{\sqrt{12029017}}{L^4 \sqrt{L^{11}}} \xi^9 + \frac{15809}{48068} \frac{\sqrt{12029017}}{L^5 \sqrt{L^{11}}} \xi^{10};$$

$$f_5(\xi) = \frac{71929}{344947} \frac{L^4 \sqrt{8968622}}{\sqrt{L^{13}}} \xi^2 - \frac{762762}{344947} \frac{L^3 \sqrt{8968622}}{\sqrt{L^{13}}} \xi^3 + \frac{2914863}{344947} \frac{L^2 \sqrt{8968622}}{\sqrt{L^{13}}} \xi^4 - \\ - \frac{4951056}{344947} \frac{L \sqrt{8968622}}{\sqrt{L^{13}}} \xi^5 + \frac{990}{103} \frac{\sqrt{8968622}}{\sqrt{L^{13}}} \xi^6 - \frac{1232036}{344947} \frac{\sqrt{8968622}}{L^3 \sqrt{L^{13}}} \xi^9 + \frac{37856}{20291} \frac{\sqrt{8968622}}{L^4 \sqrt{L^{13}}} \xi^{10}$$

и т. д. По понятным причинам мы не выписываем последующие полиномы, в системе Maple легко получить сколько угодно таких многочленов.

Если в качестве полиномов $\{\varphi_m(x)\}$, $\{\psi_n(y)\}$, $m, n = 1, 2, 3 \dots$ выбрать построенные многочлены $\{f_m(\xi)\}$, $m = 1, 2, 3 \dots$, заменив $\xi \rightarrow x$ и $L \rightarrow a$ для функций $\{\varphi_m(x)\}$ и $\xi \rightarrow y$, $L \rightarrow b$ для функций $\{\psi_n(y)\}$, то после интегрирования по частям с учетом граничных условий жесткого защемления приходим к формулам:

$$A_{1,m,n} = -\int_0^a \frac{d\varphi_m(x)}{dx} \frac{d\varphi_n(x)}{dx} dx; \quad A_{2,m,n} = -\int_0^b \frac{d\psi_m(y)}{dy} \frac{d\psi_n(y)}{dy} dy; \\ B_{1,m,n} = \int_0^a \frac{d^2\varphi_m(x)}{dx^2} \frac{d^2\varphi_n(x)}{dx^2} dx; \quad B_{2,m,n} = \int_0^b \frac{d^2\psi_m(y)}{dy^2} \frac{d^2\psi_n(y)}{dy^2} dy.$$

Числовой пример

Приведем результаты расчета перекрытия, рассмотренного в статье [1], методом, предлагаемым в данной работе. Перекрытие состоит из пяти балок, расположенных в направлении оси x и трех перекрестных балок, расположенных в направлении оси y . Все балки жестко защемлены и имеют следующие характеристики [1]: момент инерции 7080 см^4 , момент сопротивления 472 см^3 (двутавр № 30); длина главной балки 4 м, перекрестной балки 6 м. На перекрытие действует равномерно распределенная нагрузка 100 кН/м^2 .

Результаты расчета приведены на рис. 2 – 5 в виде графиков прогибов и максимальных нормальных напряжений. Используется система СИ (метры, паскали).

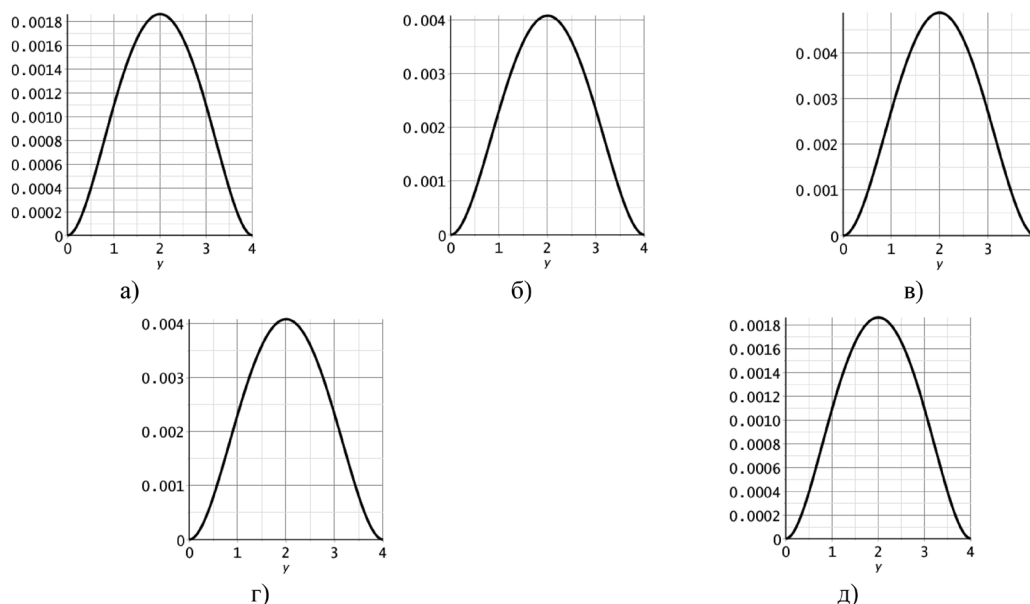


Рис. 2. Прогибы балок главного направления при: а — $j = 1$; б — $j = 2$; в — $j = 3$; г — $j = 4$; д — $j = 5$ (расчет по схеме ортотропной плиты)

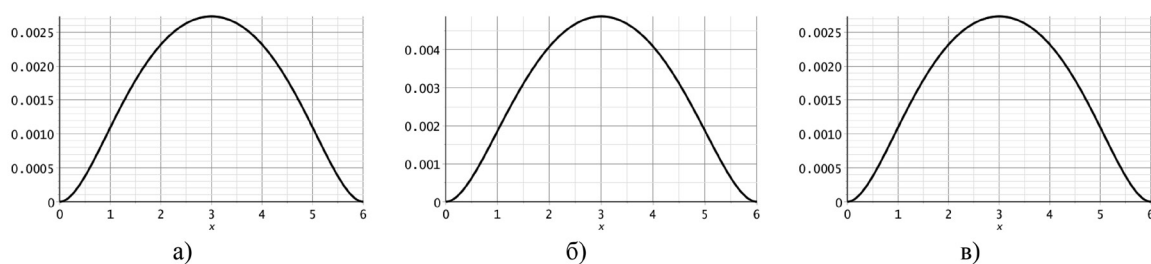


Рис. 3. Прогибы перекрестных балок при:
 $a — i = 1$; $б — i = 2$; $в — i = 3$
(расчет по схеме ортотропной плиты)

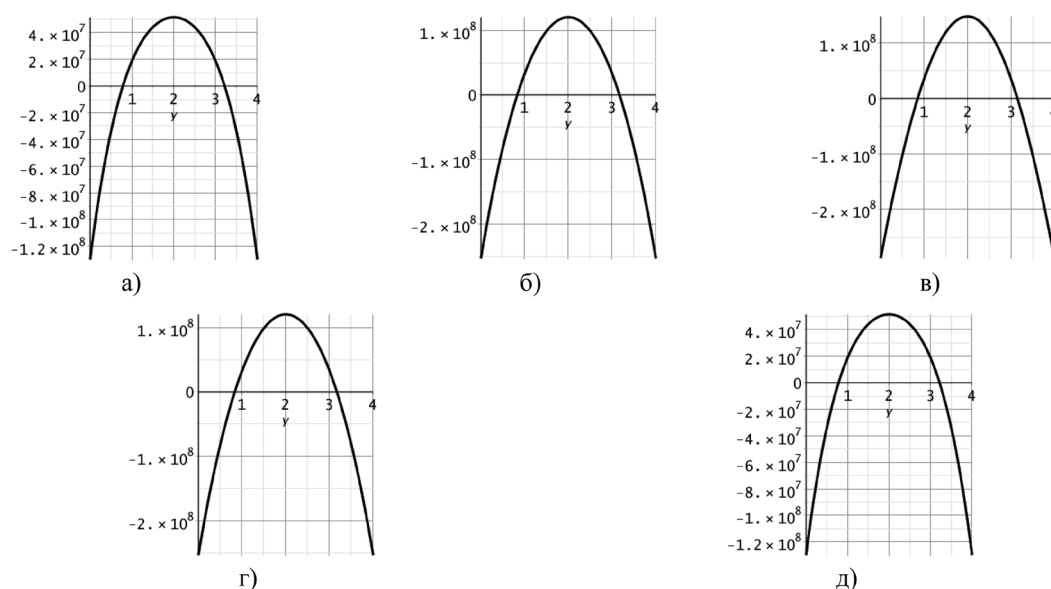


Рис. 4. Максимальное нормальное напряжение в главной балке при:
 $a — j = 1$; $б — j = 2$; $в — j = 3$; $г — j = 4$; $д — j = 5$
(расчет по схеме ортотропной плиты)

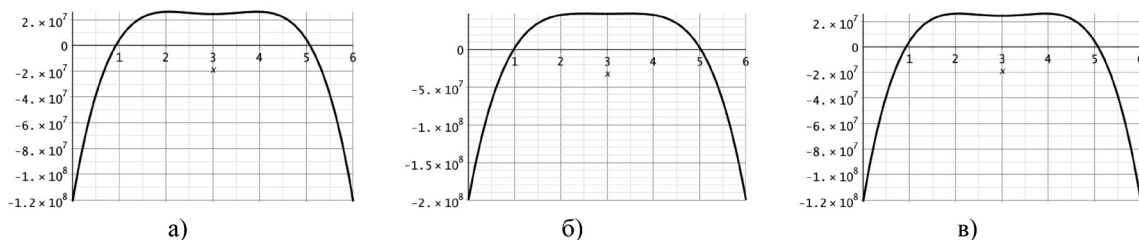


Рис. 5. Максимальное нормальное напряжение в перекрестной балке при:
 $a — i = 1$; $б — i = 2$; $в — i = 3$
(расчет по схеме ортотропной плиты)

Для сравнения воспроизведем результаты статьи [1], где выполнен расчет перекрытия по балочной схеме методом Навье уравнивания прогибов в узловых точках (рис. 6 – 9).

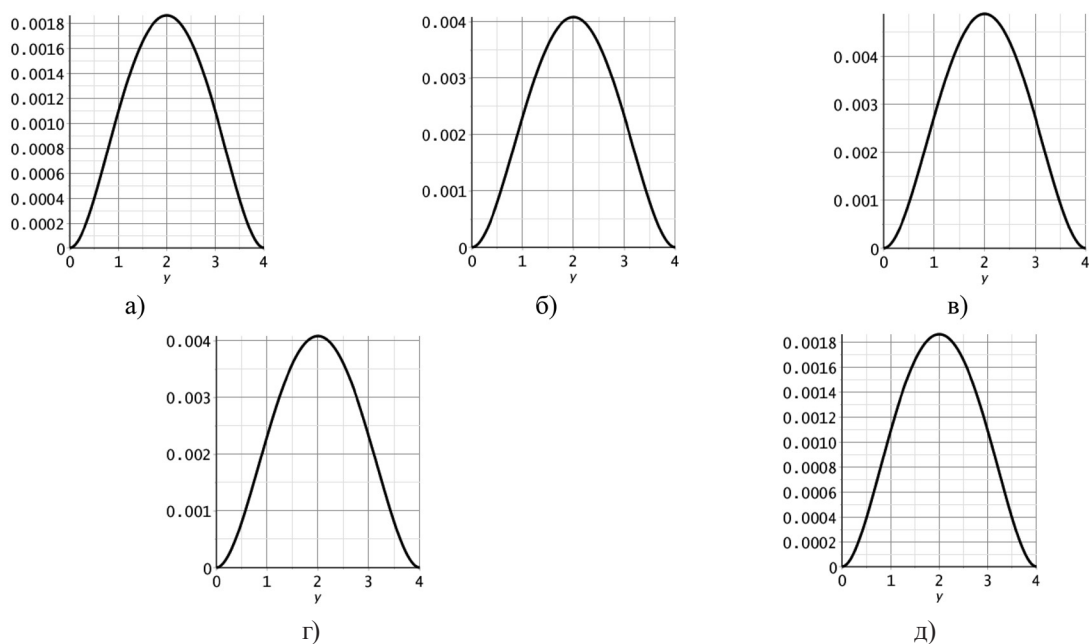


Рис. 6. Прогибы балок главного направления при: а — $j = 1$; б — $j = 2$; в — $j = 3$; г — $j = 4$; д — $j = 5$ (расчет по балочной схеме методом Навье)

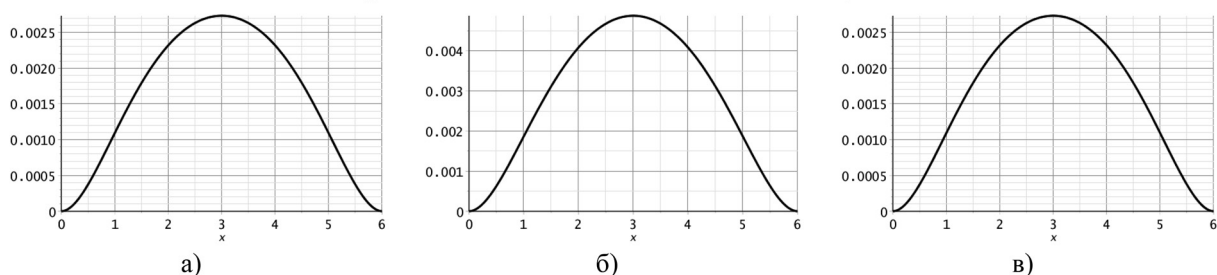


Рис. 7. Прогибы поперечных балок при: а — $i = 1$; б — $i = 2$; в — $i = 3$ (расчет по балочной схеме методом Навье)

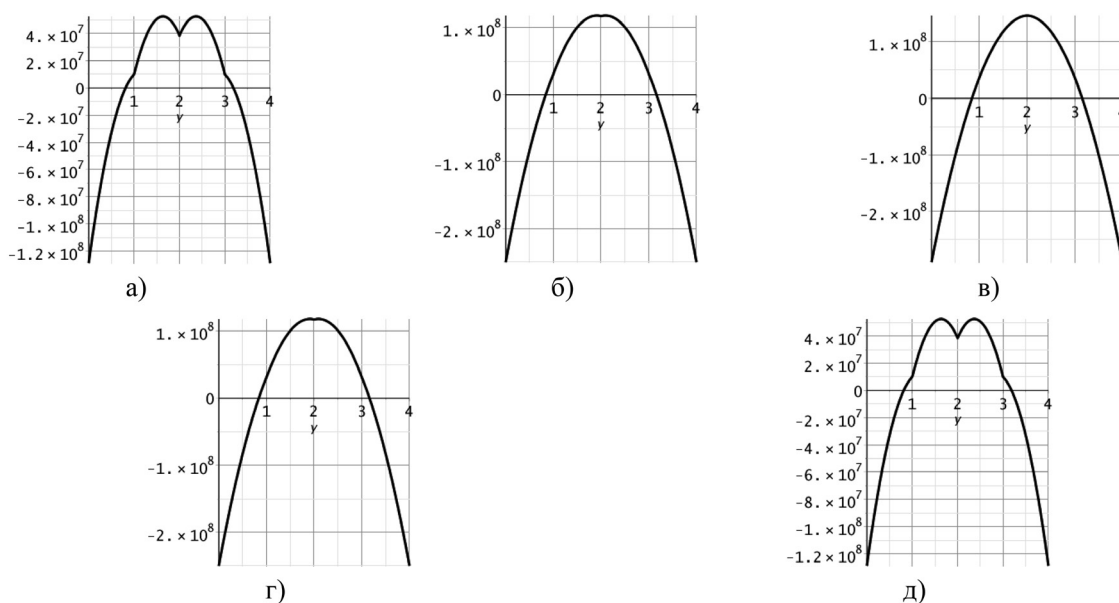


Рис. 8. Максимальное нормальное напряжение в главной балке при: а — $j = 1$; б — $j = 2$; в — $j = 3$; г — $j = 4$; д — $j = 5$ (расчет по балочной схеме методом Навье)

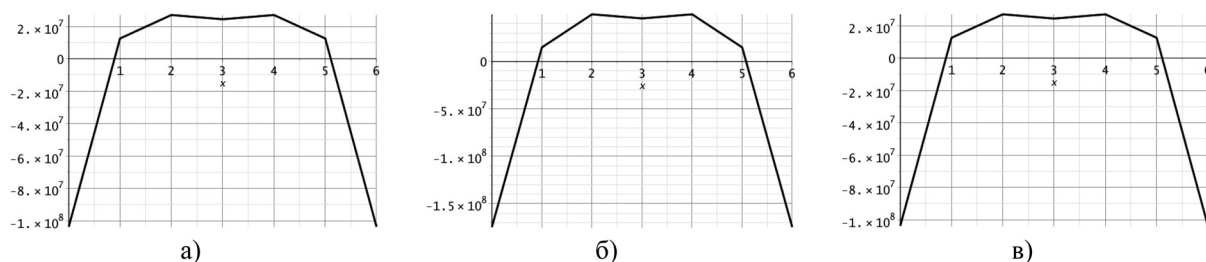


Рис. 9. Максимальное нормальное напряжение в перекрестной балке при
 $a — i = 1$; $b — i = 2$; $v — i = 3$

(расчет по балочной схеме методом Навье)

Сравнение результатов расчета по схеме ортотропной пластины и методом Навье показывает хорошее согласие. Эпюры прогибов практически полностью совпадают. Напряжения по схеме ортотропной пластины получаются сглаженными по сравнению с полученными методом Навье. Такая ситуация присуща вариационным методам и методу Бубнова — Галеркина. При этом числовые значения напряжений, даваемые схемой ортотропной пластины, незначительно выше по модулю, чем напряжения, рассчитанные по балочной схеме методом Навье, что играет положительную роль, так как идет в запас прочности.

Заключение

Результаты, изложенные в данной статье, показывают эффективность аналитического расчета балочных перекрытий различного назначения в системе аналитических вычислений Maple как с применением метода Навье, так и по схеме ортотропной пластины. Следует, однако, всегда иметь в виду условность рассмотренных подходов. При расчете перекрытий по балочной схеме необходимо учитывать наличие сплошных настилов. Схема конструктивно-ортотропной пластины позволяет учесть наличие сплошного настила, но при этом подкрепляющие настил балки как бы «размазываются» по пластине. Более адекватной математической моделью является модель ребристой пластины с учетом дискретного расположения ребер [3] – [5]. Обычно, расчет различных конструкций, в том числе и перекрытий, выполняется методом конечных элементов. Развитие вычислительной техники и создание соответствующего программного обеспечения — пакетов аналитических вычислений — привело к тому, что появилась возможность аналитического решения сложных задач математической физики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голоскоков Д. П. Расчет плоских перекрытий в системах символьных вычислений / Д. П. Голоскоков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 119–125.
2. Голоскоков Д. П. Метод полиномов в задачах теории тонких плит / Д. П. Голоскоков, П. Г. Голоскоков. — СПб.: СПГУВК, 2008. — 254 с.
3. Голоскоков Д. П. Численно-аналитические методы расчета упругих тонкостенных конструкций нерегулярной структуры / Д. П. Голоскоков. — СПб.: Изд-во А. Кардакова, 2006. — 271 с.
4. 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.
5. 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. — Казань: Изд-во Казанского университета, 2014. — С. 33–62.

6. 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.
7. Матросов А. В. Численно-аналитический алгоритм решения задач плоской деформации линейно-упругих тел сложной конфигурации / А. В. Матросов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2008. — № 3. — С. 70–84.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Shirunov G. N. A method of initial functions in analyzing a stress and strain state of an elastic layer / G. N. Shirunov // International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA). — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2014. — С. 166–167.
12. Matrosov A. V. A numerical-analytical decomposition method in analyses of complex structures / A. V. Matrosov // International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA). — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2014. — С. 96.
13. Galileev S. M. Method of initial functions for layered and continuously inhomogeneous plates and shells / S. M. Galileev, A. V. Matrosov, V. E. Verizhenko // Mechanics of Composite Materials. — 1995. — Vol. 30. — № 4. — Pp. 386–392.
14. Александров А. В. Основы теории упругости и пластичности: учебник для строит. спец. вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов. — М.: Высшая школа, 1990. — 400 с.
15. Михлин С. Г. Вариационные методы в математической физике / С. Г. Михлин. — М.: ГИТТЛ, 1957. — 476 с.

MODEL OF SHIP'S OVERLAPPIINGS AS A CONSTRUCTIVE-ORTHOTROPIC PLATE

The approximate method for analyzing ship's overlapping is considered. Offered a mathematical model of a flat slab, running on a bend, as the constructive-orthotropic plate. This method of calculating the overlap was proposed by academician Y. A. Shimansky in 1934 and developed further P. F. Papkovich, A. A. Kurdyumov, and V. A. Postnov. The calculation is performed by the Bubnov-Galerkin method, using as basis functions specially constructed orthonormal polynomials. A comparison of the results of calculation of ship overlap on the proposed model in this article and the model based on the idea of the method of Navier as the deflections of beams of the main directions and cross beams are equal at the nodal points [1]. Considered a numerical example of the calculation of overlap with rigidly clamped beams both directions. The example shows a good agreement between the two decisions on the use of models and the effectiveness use of the system of analytical calculations of Maple various purposes.

Keywords: Plane overlapping, beams, the equation of bending plate, Bubnov-Galerkin method, orthonormal polynomials.

REFERENCES

1. Goloskokov, D. P. "Calculation of plane overlappings in system of symbolical calculations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 119–125.
2. Goloskokov, D. P., and P. G. Goloskokov. *Metod polinomov v zadachah teorii tonkih plit*. SPb.: SPGUVK, 2008.
3. Goloskokov, D. P. *Chislenno analiticheskie metody rascheta uprugih tonkostennykh konstrukcij neregul'arnoj struktury*. SPb.: Izd-vo A. Kardakova, 2006.

4. Goloskokov, D. P. "Analyzing simply supported plates using Maple system." *International conference on computer technologies in physical and engineering applications, ICCTPEA 2014, Russia, Saint-Petersburg, June 30–July 4. 2014*: 57–58.
5. Goloskokov, D. P. "Primery realizacii v Maple jenergeticheskogo metoda dlja zadach izgiba tonkih plit." *IV-j mezhdunarodnyj seminar po matematicheskomu modelirovaniju v sistemah komp'juternoj matematiki KAZCAS-2014*. Kazan: Izd-vo Kazan. un-ta, 2014: 33–62.
6. Matrosov, A. V. "A numerical-analitic analysis of grillages." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2012): 8–15.
7. Matrosov, A. V. "Numerical-analytical algorithm for solving problems of plane deformation of linearly-elastic solids with irregular shapes." *Vestnik of St. Petersburg State University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes* 3 (2008): 70–84.
8. Matrosov A. V., and G. N. Shirunov. "Algorithms for obtaining closed forms of the operators of the initial functions method for three-dimensional problems of the elasticity theory." *Bulletin of civil engineers* 1(42) (2014):136–144.
9. Matrosov, A. V. "A numerically-analitical analysis of wall-beams on a linearly elastic foundation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2 (2011):14a–21.
10. Shirunov, G. N. "Analysis of the stress-strain state of elastic layer loaded locally by the initial functions method." *Bulletin of civil engineers* 5(46) (2014): 58–67.
11. Shirunov, G. N. "A method of initial functions in analyzing a stress and strain state of an elastic layer." *International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA)*. SPb.: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyi universitet, 2014: 166–167.
12. Matrosov, A. V. "A numerical-analytical decomposition method in analyses of complex structures." *International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA)*. SPb.: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyi universitet, 2014: 96–96.
13. Galileev S. M., A. V. Matrosov, and V. E. Verizhenko. "Method of initial functions for layered and continuously inhomogeneous plates and shells." *Mechanics of Composite Materials*. 30.4 (1995): 386–392.
14. Aleksandrov, A. V., and V. D. Potapov. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti: Ucheb. dlja stroit. spec. vuzov*. M.: Vyssh. shk., 1990.
15. Mihlin, S. G. *Variacionnye metody v matematicheskoj fizike*. M.: GITTL, 1957.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Голоскоков Дмитрий Петрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
GoloskokovDP@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Goloskokov Dmitriy Petrovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
GoloskokovDP@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2015 г.

УДК 65.012.45:004.02(378.1)

А. Н. Тындыкарь

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

В ходе исследования комплексов показателей, разработанных для модели образовательного процесса морского учебного заведения, возникла необходимость организации движения информационных потоков для наиболее оперативной и эффективной деятельности высшего учебного заведения. В статье предложены функциональные схемы организации образовательного процесса морского учебного заведения,

на основе чего строится оптимальный алгоритм передачи данных по комбинированной схеме, имеющей четырехуровневую блочно-иерархическую структуру, содержащую как вертикальные, так и горизонтальные связи. В частности, предлагается рассмотреть организацию информационных потоков между автоматизированной информационной системой «БРС» и автоматизированной информационной системой «Диплом», которые включают в себя средства, обеспечивающие функционал предлагаемой схемы образовательного процесса, но не имеют механизма передачи данных между собой. В качестве метода организации информационного обеспечения рассматривается составление оптимального расписания для обмена данными. В основе создания алгоритма стоят метод анализа иерархий Т. Саати и общеорганизационные методы А. А. Богданова.

Ключевые слова: информационное обеспечение, автоматизированная информационная система, образование, организация образовательного процесса.

Введение

Широкое применение современных средств вычислительной техники, и всеобщее внедрение методов оптимизации значительно изменили и требования к информационному обеспечению в образовательной деятельности морского учебного заведения. Кроме того, вопрос развития и повышения качества образования в этой сфере является актуальным согласно работам, посвященным кадровому обеспечению устойчивого развития морской транспортной инфраструктуры [1], [2], политике национальных интересов России [3], а также перспективам развития Арктической морской транспортной системы и разработки морских и шельфовых месторождений нефти и газа [4], [5]. Внедрение информационных технологий является одним из возможных методов совершенствования системы подготовки новых высококвалифицированных специалистов в области морских специальностей и способствует повышению безопасности работы на судах [6], а также более тщательному подбору кадров [7], [8], качественную подготовку которых возможно осуществить, применяя дистанционные образовательные технологии [9]. Информационное обеспечение образовательного процесса в высшем учебном заведении предполагает формирование единых баз данных и создание интерактивной среды обучения, автоматизацию документооборота и использование вычислительных сетей, включая технологию удаленного доступа. В то же время, существует множество примеров [10], [11], которые показывают, что слишком большое количество информации — это так же плохо, как и ее нехватка или отсутствие.

Учитывая тот факт, что в поддержании и повышении квалификации специалистов отрасли большую роль играют учебно-тренажерные центры, использующие наиболее передовые образовательные и информационные технологии, а также то, что требования к процессу подготовки моряков включают активное внедрение и использование различного рода инноваций [12], организацию информационного обеспечения образовательного процесса стоит начать с рассмотрения структуры и построения модели технологии обучения. При этом некоторые свойства этой модели могут вытекать из общих свойств организационной системы, и поэтому будут общими, другие же будут отражать свойства процесса обучения морского профиля в частности.

Способы оценки информационного обеспечения

Информационное обеспечение в целом включает информационные технологии и алгоритмические средства, позволяющие выполнить формирование массивов данных, составляющих информационное описание реального объекта или процесса, их обработку, организацию или структурирование и анализ.

В ходе исследования [13] модели образовательного процесса морского учебного заведения был разработан ряд комплексов показателей, в число которых вошел показатель оценки информационного обеспечения учебно-научного процесса высшего учебного заведения.

Авторы работ [14], [15] предлагают рассчитывать этот показатель на основании сравнительной оценки наличных фондов литературы в библиотеке высшего учебного заведения:

$$X = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \frac{Q'_i}{\sum_j Q'_{ij}} \right) : \frac{A_1}{\sum_j A_{1j}}; \quad (1)$$

$$Y = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \frac{Q'_i}{\sum_i Q'_i} \right) : \frac{A_1}{\sum_{i=1}^q A_i}, \quad (2)$$

где Q_1, Q_2 — количество учебной (отечественной, зарубежной) литературы; Q_3, Q_4 — количество научной (отечественной, зарубежной) литературы; Q_5, Q_6 — количество периодических изданий (отечественные, зарубежные); A — суммарная средняя численность студентов, докторантов, аспирантов и научно-педагогических кадров.

При этом $X > 1$ и $Y > 1$ показывает положительную динамику среднего значения данного показателя по измерениям за последние q лет в исследуемой образовательной организации.

Приказом № 1953 Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки в 2011 г. было установлено, что состояние информационного обеспечения обучающихся высшего учебного заведения должно рассчитываться по формуле

$$K_{\text{ЭБС}} = \frac{\sum K_i}{N_k} \cdot 100, \quad (3)$$

где значение K_i характеризует качественные или количественные параметры электронно-библиотечной системы, функционирующей в высшем учебном заведении.

При этом значение $K_{\text{ЭБС}}$ должно быть не меньше 25 баллов. На конец 2015 г. рекомендованное значение данного коэффициента составляет не менее 100 баллов.

Однако оба способа оценки информационного обеспечения не учитывают состояние технических средств, технологий и алгоритмов передачи информационных потоков, которые крайне важны и необходимы при формировании информационного обеспечения образовательного процесса. В частности, согласно требованиям конвенции ПДМНВ-78 для морского образования [12], в информационное обеспечение морского учебного заведения обязательно должны быть включены новейшие технологии, тренажеры, соответствующие современному состоянию развития информационных технологий. В этой связи выявляется необходимость разработки эффективного метода организации информационного обеспечения образовательного процесса для морского учебного заведения.

Структура учебного заведения

На основе системного анализа процессов управления автором работы [16] было установлено, что высшее учебное заведение представляет собой большую систему, отличающуюся:

- блочно-иерархической, многоуровневой и многоэлементной структурой;
- динамическими свойствами;
- стохастичностью и неопределенностью внешних и внутренних факторов;
- смешанной концепцией управления, включающей рациональное сочетание авторитарных и демократических принципов.

Рассмотрим укрупненную схему движения информационных потоков образовательного процесса (рис. 1).

К функциональным блокам области A (область ведомства преподавателя) относятся:

- a_1 — составление графика освоения дисциплины;
- a_2 — отправка графика освоения дисциплины на согласование;
- a_3 — проведение занятий;
- a_4 — заполнение ведомостей;
- a_5 — отправка результатов на контроль.

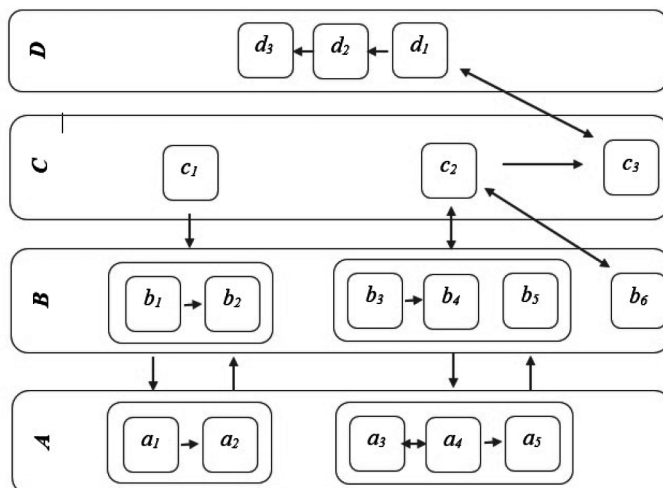


Рис. 1. Укрупненная функциональная схема движения информационных потоков образовательного процесса

К функциональным блокам области B (область ведомства заведующего кафедрой) относятся:

- b_1 — создание задачи составление графика освоения дисциплины для преподавателя;
- b_2 — согласование графика освоения дисциплины;
- b_3 — определение периодичности контроля;
- b_4 — формирование ведомостей;
- b_5 — проверка текущего обучения;
- b_6 — подведение итогов освоения дисциплин.

К функциональным блокам области C (область ведомства института) относятся:

- c_1 — контроль дисциплины и успеваемости студентов (курсантов);
- c_2 — подготовка данных для выдачи документов об образовании.

К функциональным блокам области D (область ведомства бюро дипломирования) относятся:

- d_1 — регистрация документов об образовании;
- d_2 — печать документов об образовании;
- d_3 — контроль выдачи и хранение документов об образовании.

Стоит отметить, что функциональные блоки институтов (C), а также функциональные блоки кафедр (A , B), множественно входящие в состав институтов, обычно присутствуют в неоднократном количестве. Это увеличивает объем информационных потоков, поступающих в функциональный блок бюро дипломирования (D) (рис. 2).

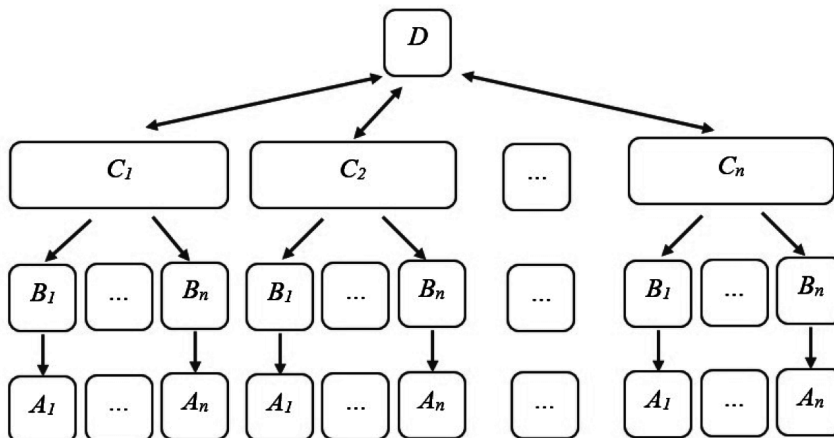


Рис. 2. Общая схема движения информационных потоков

Организация информационного обеспечения

Требования к организации информационного обеспечения рассмотрены в работе [17].

Основной целью разработки метода организации информационного обеспечения является организация эффективной работы с базами данных, создание удобного взаимодействия пользователя с системой посредством программных и технических средств. При организации информационного обеспечения образовательного процесса морского учебного заведения необходимо учесть, что схема информационных потоков должна обеспечивать надежное получение необходимого набора данных с требуемой точностью и достоверностью. При реструктуризации подразделений информационные потоки должны меняться соответствующим образом с минимальными временными затратами на перенос и изменение данных.

Частным случаем организации информационного обеспечения образовательного процесса морского учебного заведения является организация информационных потоков для обеспечения выпускников документами об образовании. Фактически эти потоки можно разделить на две составляющие:

- сбор и обработка информации об успеваемости студента или курсанта в процессе обучения (промежуточная аттестация, итоговая аттестация) — функциональные блоки *A-B-C*;
- передача информации об успеваемости студента или курсанта в подразделение, в котором будет осуществляться печать диплома и приложения к ним на бланке государственного образца — функциональные блоки *C-D*.

Для осуществления указанных задач на кафедре вычислительных систем и информатики ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова была разработана автоматизированная информационная система «БРС» [18], включающая в свой состав средства для автоматизации функциональных блоков *A-B-C*, и автоматизированная информационная система «Диплом» [19], включающая средства для автоматизации функционального блока *D*.

В соответствии с Приказом № 112 от 13 февраля 2014 г. «Об утверждении Порядка заполнения, учета и выдачи документов о высшем образовании и о квалификации и их дубликатов» диплом с приложением к нему должен быть выдан не позднее десяти дней после издания приказа об отчислении. Учитывая то, что периоды защит выпускных квалификационных работ и период вручения дипломов, как правило, накладываются друг на друга, существует ряд проблем, связанный с оперативной передачей информации из одного подразделения (отдел организации образовательного процесса института) в другое (бюро дипломирования). Следовательно, существует необходимость организации информационных потоков таким образом, чтобы необходимые данные сразу же после защиты автоматически передавались в ведомство бюро дипломирования.

Для этого необходимо внести коррективы в существующие алгоритмы информационных потоков обеих систем и дополнить их связующим механизмом — алгоритмом обмена необходимой информацией, который в данном случае происходит по комбинированной многоуровневой схеме, имеющей блочно-иерархическую структуру, которая содержит не только вертикальные, но и горизонтальные связи, а также различные критерии по уровням.

Учитывая тот факт, что печать дипломов для выпускников большинства институтов осуществляется в один и тот же промежуток времени, основной задачей организации информационного обмена является составление оптимального расписания.

Алгоритм составления оптимального расписания обработки информационных потоков

При построении алгоритма могут возникнуть некоторые противоречия, например, наложение одного комплекта «диплом — приложение к диплому» *DP* на комплект «диплом — приложение к диплому» *DP* по другому направлению подготовки. Согласно концепции всеобщей организационной науки А. А. Богданова [20] разрешение системных противоречий — контрдифференциация — может происходить путем образования связки под действием механизмов подбора, консервативного и прогрессивного (отрицательного и положительного). Для этого предлагается найти

в возникающих противоречиях общие черты и привести их в такое соотношение, чтобы они объединились в одну общую цель. В качестве универсального тектологического закона предлагается применить закон «равновесия» Ле-Шателье.

Учитывая наличие обратных связей в схеме движения информационных потоков, следует рассмотреть участок передачи информационных потоков между функциональным блоком $A-B-C$ и D .

Рассмотрим предлагаемый алгоритм.

1. Обозначим множества объектов, которые необходимо учитывать при составлении расписания:

- $DP = \{1, 2, \dots, n\}$ — множество комплектов «диплом — приложение к диплому»;
- $O = \{o_i\}, i = 1, \dots, N_o$ — множество направлений подготовки (образовательных программ);
- $T = \{t_j\}, j = 1, \dots, N_t$ — множество временных интервалов.

2. Для каждого комплекта $j \in DP$ опытным путем установим средний промежуток времени выполнения $t_{\min j} > 0$, время поступления задания $t_{\text{get } j} \geq 0$, срок, к которому печать должна быть завершена $t_{dj} > 0$.

3. Установим средний промежуток времени, необходимый для осуществления печати комплектов DP для целого потока студентов (курсантов) в рамках одного направления подготовки

$$t_s = k \cdot t_{\min j}, \quad (4)$$

где k — количество студентов (курсантов) в группе в рамках одного направления подготовки.

4. Момент начала выполнения обозначим $t_{sj} \geq t_{\text{get } j}$, момент окончания выполнения — $t_{fj} = t_{sj} + t_{\min j} \leq t_{dj}$.

5. Следует учесть поступление следующего задания $i \in DP$: если $t_{fj} < t_{fi}$, то $t_{sj} + t_{\min j} \leq t_{fi}$, где t_{fi} — момент начала выполнения печати следующего комплекта DP_i .

6. Общее количество временных промежутков N_t будет рассчитываться как отношение количества часов работы оператора к количеству времени, необходимому для печати комплекта DP для целой группы студентов (курсантов) в рамках одного направления подготовки.

7. Расписание обработки информационных потоков определим векторами

$$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_{N_o}), \beta = (\beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_{N_t}), \quad (5)$$

где $\alpha_i \in O$ — код направления подготовки, по которой выпускается группа студентов (курсантов); $\beta_i \in T$ — код временного интервала, назначенного для печати комплектов DP группы студентов (курсантов) в рамках соответствующего направления подготовки.

8. Критерий оптимальности расписания печати определим как требование, предъявляемого к алгоритму — минимизацию времени задержки печати комплекта DP (в расчет примем промежутки между поступлением информационного потока от функционального блока C в ведомство функционального блока D до завершения очереди печати для данного направления подготовки) следующим образом:

$$\sum_{j=1}^n t_{fj} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Приведем пример расчета согласно приведенному в таблице алгоритму.

Пример расчета

	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
$t_{\min j}$	9	5	5	6
$t_{\text{get } j}$	0	4	5	13
t_{dj}	10	13	12	18
t_{sj}	0	11	9	14
t_{fj}	9	16	14	20

В данном примере оптимальный порядок выполнения печати определен следующим образом: 1 – 3 – 2 – 4.

На мнемосхеме (рис. 3) показаны основные этапы проверки согласно приведенному алгоритму.

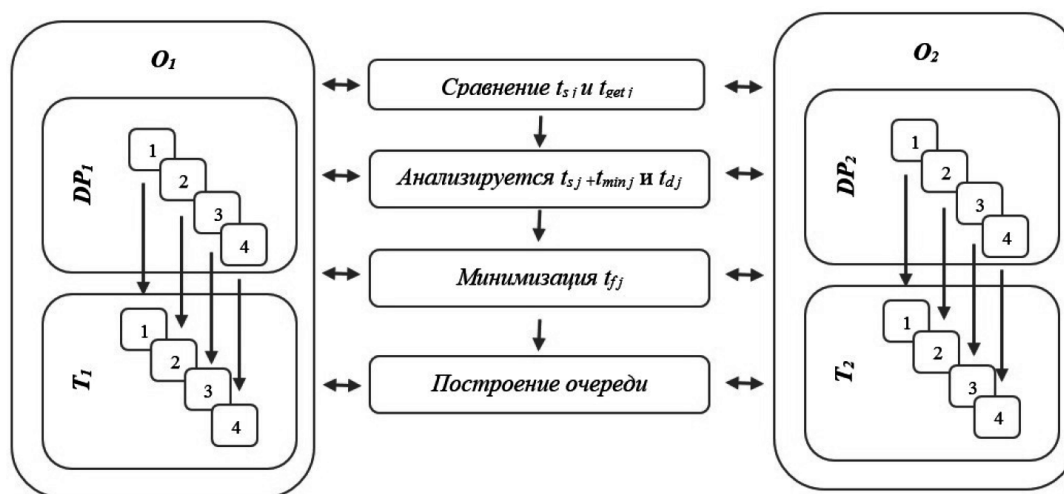


Рис. 3. Мнемосхема алгоритма

В качестве критерия для оценки оптимальности и эффективности способа организации информационных потоков в данном случае предлагается учитывать отношение завершенных операций к их общему количеству на соответствующий момент времени

$$I = \frac{k_f}{k_{get}}, \quad (7)$$

где k_f — количество завершенных операций; k_{get} — количество полученных заданий на соответствующий момент времени.

Выводы

В статье рассмотрены существующие способы оценки информационного обеспечения, выделен их недостаток — отсутствие учета состояния технических средств, технологий и алгоритмов передачи информационных потоков, которые крайне важны и необходимы при формировании информационного обеспечения образовательного процесса согласно требованиям конвенции ПДМНВ-78 для морского образования. Исследование существующих работ [16], [21], [22], посвященных применению информационных технологий в образовательном процессе, показало, что вопрос организации движения информационных потоков в них опущен.

В настоящей работе предложена укрупненная схема движения информационных потоков образовательного процесса морского учебного заведения, в которой выделены основные функциональные блоки. В качестве метода организации движения информационных потоков был предложен подход, основанный на составлении расписания передачи рабочей информации для последующего выполнения. В этой связи на примере движения информационных потоков между автоматизированной информационной системой «БРС» и автоматизированной информационной системой «Диплом» был разработан алгоритм составления расписания, позволяющий оптимально распределить и упорядочить процесс печати дипломов и приложений к ним, что является немаловажным при выпуске документов об образовании в морском учебном заведении.

Таким образом, в работе представлен метод организации движения информационных потоков, позволяющий выбрать оптимальный порядок выполнения задач, а также способ оценки его эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин А. А. Новый вектор профессионального транспортного образования / А. А. Кузьмин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 55–64.
2. Степанов А. Л. Кадровое обеспечение устойчивого развития морской транспортной инфраструктуры / А. Л. Степанов, Е. В. Носкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 83–89.
3. Павловский И. В. Политика национальных интересов России: вектор развития современной России / И. В. Павловский. — М.: Промиздат, 2008. — 446 с.
4. Лебедев Г. В. Перспективы развития Арктической морской транспортной системы / Г. В. Лебедев, Г. Е. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 179–189.
5. Антонова О. Д. Арктический шельф — область геополитических и экономических интересов России / О. Д. Антонова, Г. В. Лебедев, Г. Е. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 202–214.
6. Андрюшечкин Ю. Н. К вопросу использования современных информационных технологий для обеспечения безопасности судоходства на внутренних водных путях России / Ю. Н. Андрюшечкин, Ю. В. Каретников, А. П. Яснов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 208–213.
7. Крупенина Н. В. Организация распределенной системы подготовки и проведения электронного тестирования для оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей / Н. В. Крупенина, Н. Ю. Барышникова, Л. Н. Тындыкарь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 216–228.
8. Барышникова Н. Ю. Распределенная тестовая система оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей / Н. Ю. Барышникова, Л. Н. Тындыкарь // ИТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА: материалы III науч.-исслед. конф. студентов и аспирантов факультета информационных технологий 19 декабря 2014 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — С. 18–20.
9. Тарануха С. Н. Дистанционные образовательные технологии в системе качества подготовки членов экипажей судов / С. Н. Тарануха // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 216–222.
10. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process / T. L. Saaty // International journal of services sciences. — 2008. — Vol. 1. — № 1. — Pp. 83–98.
11. Bauk S. I. Assessing students' perception of e-learning in blended environment: an experimental study / S. I. Bauk // Procedia-Social and behavioral sciences. — 2015. — Vol. 191. — Pp. 323–329. DOI:10.1016/j.sbspro.2015.04.
12. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несения вахты 1978 года (ПДМНВ-78) с поправками (консолидированный текст). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010.
13. Тындыкарь Л. Н. Разработка системы показателей для модели образовательного процесса морского учебного заведения / Л. Н. Тындыкарь // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2016. — № 1. — С. 105–115.
14. Ризен Ю. С. Математическое моделирование образовательного процесса в оценке качества деятельности ВУЗа / Ю. С. Ризен, А. А. Захарова, М. Г. Минин // Информационное общество. — 2014. — № 3. — С. 25–33.
15. Ризен Ю. С. Функционалы оценки показателей потенциала ВУЗа / Ю. С. Ризен, А. А. Захарова // Наука, техника и образование. — 2014. — № 5 (5). — С. 88–89.
16. Васильев В. Н. Модели управления вузом на основе информационных технологий / В. Н. Васильев. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. — 164 с.
17. Ключ В. В. Разработка моделей системы информационного обеспечения безопасности промышленных объектов / В. В. Ключ, А. Ю. Янченко // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». — 2013. — № 4. — С. 31–38.
18. Егоров А. Н. Автоматизация учета успеваемости студентов в условиях БРС при наличии различных шкал оценки их знаний / А. Н. Егоров, Н. В. Крупенина, Л. Н. Тындыкарь // Информационные технологии в образовании XXI века: сб. науч. тр. II Всероссийской науч.-практич. конф. — Т. 2. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012. — С. 231–235.

19. Барышникова Н. Ю. Организация распределенной АИС для печати дипломов о высшем профессиональном образовании / Н. Ю. Барышникова, А. Н. Егоров, Н. В. Крупенина, Л. Н. Тындыкарь // Новые информационные технологии в образовании: сб. науч. тр. XVI междунар. науч.-практич. конф. «Новые информационные технологии в образовании» (Применение технологий «IC» для формирования инновационной среды образования и бизнеса), 3–4 февраля 2015 г. — Ч. 1. — М.: ООО «IC-Паблишинг», 2015. — С. 547–549.

20. Богданов А. А. Тектология: всеобщая организационная наука / А. А. Богданов. — М.: Международный институт Александра Богданова, 2003. — 496 с.

21. Hubalovsky S. System approach, modeling, simulation as educational technologies in algorithm development and programming / S. Hubalovsky // Procedia-Social and behavioral sciences — 2015. — Vol. 191. — Pp. 2226–2230. DOI:10.1016/j.sbspro.2015.04.267.

22. Surej P. J. The integration of information technology in higher education: A study of faculty's attitude towards IT adoption in the teaching process / P. J. Surej // Contaduría y Administración. — 2015. — № 60. — Pp. 230–252. DOI:10.1016/j.cya.2015.08.004.

DEVELOPMENT OF METHOD FOR ORGANIZATION INFORMATION SUPPORT TO EDUCATIONAL PROCESS

During researches on complexes to define efficiency and quality of educational activity developed for model of educational process at marine educational institution there was a need of the organization movement of information streams for the most operational and effective activity in high education. New function charts of educational process at marine education are to be defined. Optimization algorithm of data transmission according to the combined scheme having the four-level block and hierarchical structure with both vertical and horizontal communications under construction are offered. Particularly, the method of information streams organization between automated information system «BRS» and the automated information system «Diploma» which includes means providing functionality of the offered scheme at educational process is offered, but have no data transmission mechanism among themselves. As a method of the organization of information support drawing up the optimum schedule for data exchange is considered. The elaboration is based at the method of the analysis of hierarchies by T. Saati and general organization methods by A. A. Bogdanov.

Keywords: information support, automated information system, education, organization of educational process

REFERENCES

1. Kuzmin, A. A. "A new vector of professional transport education." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2011): 55–64.
2. Stepanov, A. L., and E. V. Noskova. "Staffing of sustainable development of maritime transport infrastructure." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 83–89.
3. Pavlovskij, I. V. *Politika nacionalnyh interesov Rossii: vektor razvitiya sovremennoj Rossii*. M.: Promizdat, 2008.
4. Lebedev, G. V., and G. E. Rumjancev. "The prospects of arctic marine transportation system's development." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 179–189.
5. Antonova, O. D., G. V. Lebedev, and G. E. Rumjancev. "The arctic shelf — area of geopolitical and economical interests of Russia." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(26) (2014): 202–214.
6. Andriushechkin, Ju. N., Ju. V. Karetnikov, and A. P. Jasnov. "On the question of the use of modern information technology for navigation safety on inland Russian waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 208–213.
7. Krupenina N. V., N. Ju. Baryshnikova, and L. N. Tyndykar. "Organization of a distributed system by electronic testing for conformity assessment of professional competencies by employees of maritime specialties." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 216–228.

8. Baryshnikova, N. Ju, and L. N. Tyndykar. "Distributed test system for conformity assessment of professional competencies by employees of maritime specialties." *IT: VChERA, SEGODNJJa, ZAVTRA: materialy III nauch.—issled. konferencii studentov i aspirantov fakul'teta informacionnyh tehnologij, 19 december 2014*. SPb.: Izd—vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015: 18–20.
9. Taranuha, S. N. "Distance education technologies in the quality management system of training seafarers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 216–222.
10. Saaty, Thomas L. "Decision making with the analytic hierarchy process." *International journal of services sciences* 1.1 (2008): 83–98.
11. Bauk, Sanja I. "Assessing students' perception of e-learning in blended environment: an experimental study." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 191 (2015): 323–329. DOI:10.1016/j.sbspro.2015.04.
12. International Convention on Standards of training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978 (STCW 1978), as amended (consolidated text). SPb.: ZAO "CNIIMF", 2010.
13. Tyndykar, L. N. "Development of indices complexes for model of maritime educational process." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 1 (2016): – 105–115.
14. Riesen, Y. S., A. A. Zakharova, and M. G. Minin. "Mathematical modeling of the educational process in assessing the quality of a higher education institution's operation." *Information society* 3 (2014): 25–33.
15. Rizen, Y. S., and A. A. Zakharova. "Funkcionalny ocenki pokazatelej potentsiala VUZa." *Nauka, tehnika i obrazovanie* 5(5) (2014): 88–89.
16. Vasilev, V. N. *Modeli upravlenija VUZom na osnove informacionnyh tehnologij*. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2000.
17. Klyuy, V. V., and A. Yu. Yanchenko. "Development of industrial facilities systems of security information providing models." *Nauchno-analiticheskij zhurnal "Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MChS Rossii"* 4 (2013): 31–38.
18. Egorov, A. N., N. V. Krupenina, and L. N. Tyndykar. "Avtomatizaciya ucheta uspevaemosti studentov v usloviyah BRS pri nalichii razlichnyh shkal ocenki ih." *Informacionnuye tehnologii v obrazovanii XXI veka: sbornik nauchnyh trudov II Vserossiiskoy nauchno-practicheskoy konferencii*. Vol. 2. M.: NIYU MIFI, 2012: 231–235.
19. Baryshnikova, N. Ju., A. N. Egorov, N. V. Krupenina, and L. N. Tyndykar. "Organizacija raspredelennoj AIS dlja pečati diplomov o vysshem professional'nom obrazovanii." *Novye informacionnye tehnologii v obrazovanii: sb. nauch. tr. XVI mezhdunarodnoj nauchno-practicheskoy konferencii «Novye informacionnye tehnologii v obrazovanii» (Primenenie tehnologij «IS» dlja formirovanija innovacionnoj sredy obrazovanija i biznesa)*, 3–4 fevralja 2015 g. Vol. 1. M.: OOO «IS-Publishing», 2015: 547–549.
20. Bogdanov, A. A. *Tectologia: vseobshaya organizacionnaya nauka*. M.: Meshdunarodnyy institut imeni A.A. Bogdanova, 2003.
21. Hubalovsky, Stepan. "System approach, modeling, simulation as educational technologies in algorithm development and programming." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 191 (2015): 2226–2230. DOI:10.1016/j.sbspro.2015.04.267.
22. Surej, P. John. "The integration of information technology in higher education: A study of faculty's attitude towards IT adoption in the teaching process." *Contaduría y Administración* 60 (2015): 230–252. DOI:10.1016/j.cya.2015.08.004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тындыкар Любовь Николаевна — аспирант.
Научный руководитель:
Крупенина Наталия Викторовна —
кандидат технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
tyndykar@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tyndykar Ljubov Nikolaevna — postgraduate.
Supervisor:
Krupenina Natalija Viktorovna —
PhD, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
tyndykar@bk.ru

ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ СУДОВ

Статья посвящена обзору методов навигации судов на основе спутникового определения местоположения. Данный метод предусматривает создание комплексной системы спутников на околоземной орбите, модернизацию судов и их навигационного оборудования, обучение моряков и обслуживающего персонала и устранение тормозящих внедрение факторов. В статье рассмотрены варианты спутниковой навигации в мире, дается оценка всех существующих систем спутниковой навигации по количеству спутников и распространенности. Описывается принцип работы используемых в навигации спутниковых систем, основанных на приемниках ГЛОНАС/GPS и системах СМС «Виктория», которые сравнивают периоды между временем приема синхронизированного сигнала от навигационных спутников. В статье для вычисления GPS координат объекта приводится формула, по которой работают все навигационные приемники. В статье рассмотрена зона покрытия спутниковой связи, основанной на терминалах Инмарсат. Для увеличения точности определения координат судна используется принцип работы в режиме дифференциальной навигации у спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. В совокупности повсеместное внедрение систем спутниковой навигации при хорошо проработанной и созданной технической базе должно в итоге вывести систему на запланированную мощность в целях глобального мониторинга движения судов.

Ключевые слова: навигация, спутник, суда, GPS, ГЛОНАСС, Инмарсат, СМС «Виктория».

СРАЗВИТИЕМ морского и речного судоходства все более остро встает проблема обеспечения безопасности судоходства [1] – [3], необходимости отслеживания положения судна для определения координат [4] – [6], корректировки дальнейшего курса [6], контроля передвижения транспортных средств компанией-владельцем и заказчиком, чей груз перевозят [7] – [9], и т. п. В конце XX в. в Америке начались разработки новой технологии, призванной отвечать за позиционирование различных объектов на земной поверхности. Данная технология получила название «NAVSTARGPS». Как часто бывает, сначала технология была под грифом секретности и использовалась исключительно военными и для военных целей. Возможности применения данной технологии для гражданских нужд рассмотрены в серии работ [5] – [14]: для помощи при позиционировании авиатехники [10], для контроля и помощи в поиске маршрута для автомобилей [7], [9], для навигации судов [6], [8], [11], [12], в морском бурении [5], [13], [14] и еще во множестве различных сфер деятельности. Советский Союз активно использовал американскую систему. Спутниковые технологии появились у нас на 10 лет позже, чем в США.

При внедрении любой новой системы возникают проблемы, которые связаны со специфическими особенностями использования. В частности, спутниковые навигационные системы и их внедрение на судах водного транспорта тормозят следующие факторы.

1. Отсутствие стимулирующих факторов для закупки навигационного оборудования. Нет соответствующих законов.
2. Отсутствие подробных баз электронных картографических систем.
3. Отсутствие должного опыта использования данного оборудования командой корабля. Необходимо проводить обучение.
4. Высокая стоимость устанавливаемого оборудования. За простой комплекс необходимо заплатить около 100 тыс. руб., что невыгодно владельцам небольших речных буксиров.
5. Мертвые зоны в покрытии сигналом.

Несмотря на тормозящие факторы, техническая составляющая данной задачи постоянно совершенствуется.

В данное время в мире используется четыре варианта спутниковой навигации:

Galileo — 30 спутников серии GALILEO;

Compass — 51 спутник (планируется вывести на орбиту 66 спутников);

GPS — 31 спутник семейства NAVSTAR GPS;

ГЛОНАСС — 24 спутника серии ГЛОНАСС-М.

В [15] рассматривается принцип работы системы Галилео (Galileo), предназначенной для решения различных задач геодезического мониторинга. Она представляет собой объединенный проект Европейского союза и космического агентства. Данный объединенный проект входит в состав большой системы, получившей название Трансевропейские сети. Галилео не планируется использовать для навигации судов и определения местоположения различных отслеживаемых объектов как в небе, так и на земной поверхности. В [16] – [17] рассматривается принцип работы системы Компас (Compass), первоначально имевшей название Бэйдоу и предназначенной для регионального позиционирования. В Китае проводится большая работа по созданию на земле центров по мониторингу земной поверхности с целью предупреждения землетрясений и различных стихийных бедствий. Выход на коммерческую мощность планируется к 2020 г. После выхода на коммерческую мощность планируется использование системы для навигации различных типов судов.

На территории России разрешены к использованию в навигации системы ГЛОНАСС и GPS. В данное время появились совмещенные приемники ГЛОНАСС/GPS, в которых осуществляется прием сигналов от спутников обеих систем спутниковой навигации. Авторы работ [1], [4], [8], [18], [19] приводят доводы в пользу данного решения, которое позволило обеспечить бесперебойность навигации в различных условиях и увеличить точность определения местоположения.

Самой распространенной системой спутниковой навигации в мире является GPS. Россия активно занимается внедрением своей системы спутниковой навигации ГЛОНАСС. ГЛОНАСС/GPS-технология включает в себя три ключевые составляющие: космическую, управляющую и пользовательскую. ГЛОНАСС/GPS применяются для определения координат с использованием систем, получивших название спутниковые радионавигационные системы (СРНС). Это определение применяется как для системы GPS, так и для ГЛОНАСС. Спутники постоянно транслируют радионавигационные сигналы, содержащие данные об их положении и времени, а также специальные коды. Координаты судна находят, используя ГЛОНАСС/GPS-оборудование. В [10], [20] описывается основной принцип работы, который заключается в сравнении периодов между временем приема сигналов от спутников оборудованием на судне и временем отправки этих сигналов. В настоящее время точности в несколько метров при определении местоположения такого крупного объекта, как судно, вполне достаточно. По завершению последнего этапа (по плану к 2020 г.) предполагается дальнейшее снижение погрешности в определении координат судна.

Для определения координат GPS-приёмнику нужно решить систему уравнений, вывод которых приведен в [20]:

$$|x - a_j| = c(t_j - \tau), \forall j \in 1 \dots n,$$

где x — искомое расположение пользователя; a_j — расположение j -го навигационного спутника; c — скорость света; t_j — время, когда сигнал от j -го спутника принят GPS-приёмником; τ — время одновременной отправки сигнала всеми навигационными спутниками; n — количество спутников, необходимых для однозначности решения.

Глобальная навигационная система в России развивалась очень медленно, но с недавних пор деятельность в этом направлении резко активизировалась. Созданы департаменты, комитеты и группы в разных государственных структурах, ответственных за продвижение ГЛОНАСС. Системой ГЛОНАСС в настоящее время занимается Федеральное космическое агентство «Роскосмос» и ОАО «Информационные спутниковые системы». Данная система предназначена для навигации и позиционирования большого количества пользователей данной системы. Система работает для космического, воздушного, морского и наземного базирования контролируемых объектов. Гражданские лица могут получить доступ к сигналу ГЛОНАСС абсолютно бесплатно и по всей

планете. Основным отличием ГЛОНАСС от GPS является то, что спутники российской технологии не вступают в резонанс с планетарным вращением. Данная инновация позволила добиться большой стабильности в их работе и исключить необходимость в корректировке орбиты за весь срок службы.

В ГЛОНАСС/GPS-приемниках используются два вида отображения навигационной информации, представленные в [15], [16]:

- цифровое отображение координат, скорость, пройденный путь и т. п. Также присутствуют буквенные сочетания, поясняющие цифровые данные — сокращения слов (например, SPD — Speed, TRK — Track и др.), наименования путевых точек;

- графическое отображение осуществляется с помощью представления судна на экране прибора, которое повторяет движение судна в реальном времени с наложением на карту местности.

В [21], [22] рассматривается принцип действия систем мониторинга. С 2000 г. в навигации судов, как речных, так и морских, использовалась система мониторинга «Виктория». Данная система позволяла отслеживать координаты судна только два раза в сутки. Отслеживание происходило автоматически. Суда оборудованы спутниковыми станциями Инмарсат и навигационными приемниками. Информация о местоположении объекта автоматически считывается судовой станцией Инмарсат и через спутниковый канал в виде коротких информационных потоков передается на земную станцию, располагающуюся на берегу. Земная станция по наземным каналам доставляет эту информацию в СМС «Виктория». СМС «Виктория» расшифровывает полученную информацию и с привязкой к электронным картам местности представляет ее заинтересованным в информации пользователям. Пользователи СМС «Виктория» имеют возможность отслеживать местоположение судов путем автоматического получения координат с оборудования Инмарсат.

Международная морская организация (ИМО) в 2006 г. ввела судовую систему оповещения, которая выдает в автоматическом режиме координаты судна четыре раза в сутки. Координаты для них приходят на приемники стандарта ГЛОНАСС и GPS. Данные системы необходимо устанавливать в обязательном порядке на судах с большой грузоподъемностью, судах, совершающих международные рейсы, и на все виды пассажирских судов.

В настоящее время для морских судов, совершающих международные рейсы, необходимо сообщать координаты шесть раз в сутки. Судовое оборудование использует стандарт Инмарсат, а координаты для них приходят на GPS-приемники [22]. Зона покрытия спутниковой связи Инмарсат показана на рис. 1.

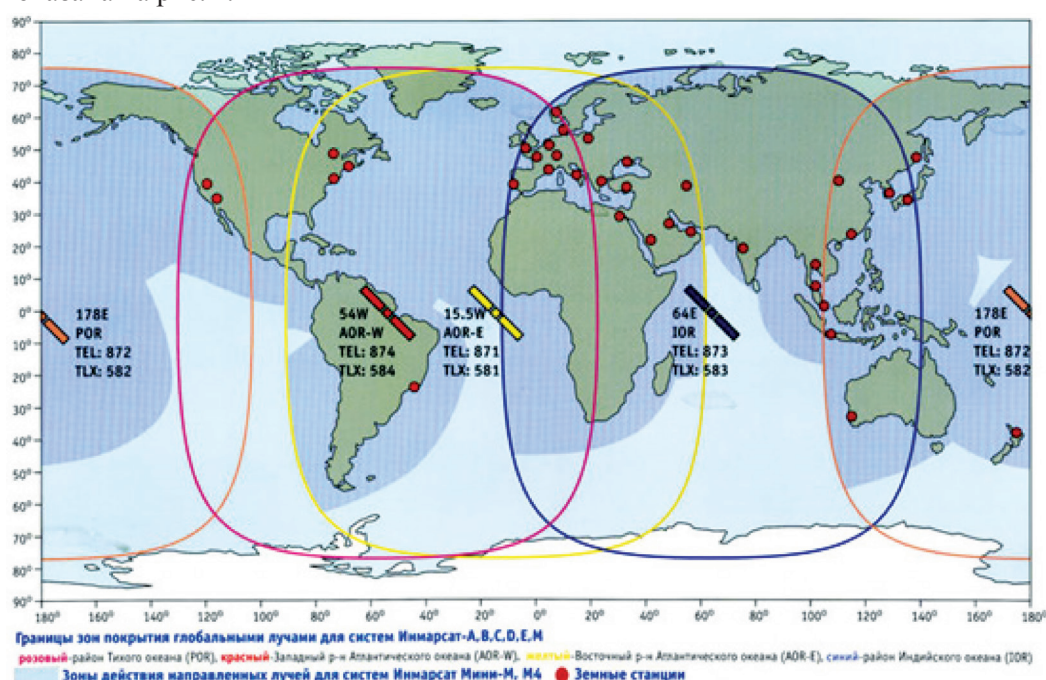


Рис. 1. Зона покрытия спутниковой связи Инмарсат

За время использования аппаратуры спутниковой навигации она доказала свою надежность и высокую точность.

В работах [1], [18], [23] описывается принцип работы в дифференциальном режиме. Для лучшего определения расположения судна системами ГЛОНАСС/GPS используется дифференциальный режим работы (рис. 2).

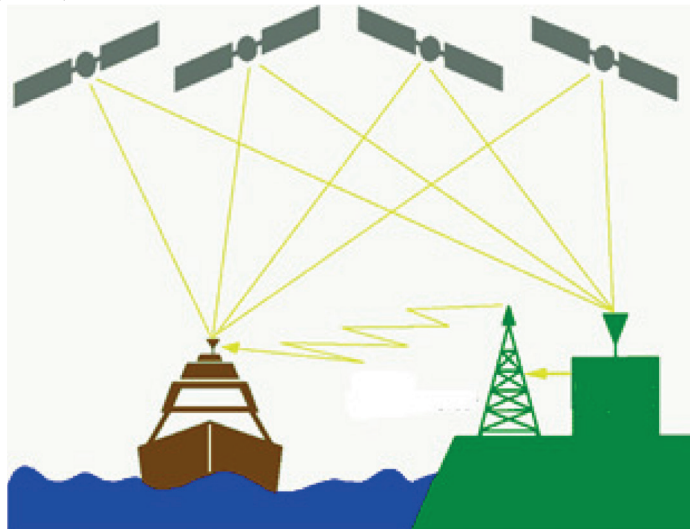


Рис. 2. Дифференциальный режим работы

Дифференциальный режим реализуется с помощью специального приемника, называемого базовой станцией. В работах [6], [11], [20] описывается принцип, с помощью которого происходит сравнение известных координат судна и вычисленных с помощью специальных обрабатывающих алгоритмов. Компьютер базовой станции вносит изменения, которые передаются судоводителям по каналам связи [23] – [25]. В ряде работ, например, [1] – [3], [18], [26], описываются способы реализации дифференциального метода, из которых на сегодня можно выделить следующие:

- системы дифференциальной навигации по кодовым измерениям строятся по принципу измерения и обработки мнимых дальних расстояний. Их погрешность в местоопределении судна колеблется от долей метра до нескольких метров;

- системы дифференциальной навигации по псевдофазовым измерениям обеспечивают определение координат судна с очень высокой точностью. Однако нахождение приемника в таком методе не позволяет удалять его от базовой станции далее 90 км в зависимости от типа местности.

Для осуществления безопасного судоходства используется первый способ, так как расстояния мониторинга исчисляются сотнями километров.

Автор работ [27], [28] П. В. Викулин проводит анализ метода передачи поправок при определении местоположения в дифференциальном режиме ГЛОНАСС/GPS на внутренних водных путях. В данном методе используются 39 береговых станций автоматических идентификационных систем (АИС). Здесь для обеспечения безопасности судоходства большое значение имеет защищенность передаваемой информации по каналам передачи поправок [29] – [31].

В итоге, несмотря на некоторые проблемы, которые присущи любому проекту внедрения новой системы, спутниковая навигация постепенно будет установлена на всех судах морской и речной навигации, в первую очередь, из-за заинтересованности в отслеживании коммерческих судов. Требования к технической начинке судов постоянно ужесточаются. В современном мире это особенно касается средств навигации, поскольку количество задач, выполняемых на воде, и количество судов, курсирующих по своим маршрутам, неуклонно растет. Если рассматривать техническую сторону внедрения спутниковых навигационных систем в морской и речной навигации, то она проработана достаточно хорошо. Количество спутников ГЛОНАСС/GPS на околоземной орбите и применение дифференциального режима работы дают результаты, точность которых

приемлема для эффективного отслеживания судов и других объектов. Существующие технологии в полной мере позволяют контролировать не только передвижение судов, но и обеспечивают решение ряда других задач [32] – [34]. Однако для расширения сферы использования средств и методов спутниковой навигации, для повышения их эффективности необходимо решить ряд организационных проблем, связанных со специфическими особенностями их применения на судах водного транспорта, на сухопутных видах транспорта и в других областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нырков А. П.* Навигационные системы ГЛОНАСС/DGPS в обеспечении безопасности судоходства / А. П. Нырков, Г. Б. Чистяков // Материалы междунар. науч.-практич. конф., посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление». 1–2 октября 2009 г. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2009. — С. 89–92.
2. *Нырков А. П.* Современные информационные технологии в обеспечении безопасности судоходства / А. П. Нырков, Г. Б. Чистяков // Сб. тр. Седьмой междунар. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. — Т. 2. — С. 198–202.
3. *Нырков А. П.* Информационные технологии в обеспечении безопасности судоходства на внутренних водных путях / А. П. Нырков, А. А. Нырков // Материалы конф. «XIV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика – 2014» (РИ–2014). — СПб.: СПОИСУ, 2014. — 279 с.
4. *Mamunts D. G.* Using information technologies in dredging / D. G. Mamunts, S. S. Sokolov, A. P. Nyrkov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2015 — Vol. 91. — Pp. 012064. DOI:10.1088/1757-899X/91/1/012064.
5. *Нырков А. П.* Контроллинг работоспособности морских буровых платформ акватории Крымского полуострова в режиме санкций / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2015. — № 12. — С. 11–17.
6. *Нырков А. П.* Алгоритм управления движением судов, идущих пересекающимися курсами / А. П. Нырков, П. В. Викулин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 100–105.
7. *Нырков А. П.* Контроль целостности данных при мониторинге транспортных средств / А. П. Нырков, Н. Ю. Вайгандт // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 54–61.
8. *Нырков А. П.* Обеспечение безопасности автоматизированных систем управления движением судов при помощи технологии референчных станций / А. П. Нырков, С. С. Соколов, Н. Ю. Вайгандт // Морская радиоэлектроника. — 2013. — № 2 (44). — С. 48–50.
9. *Нырков А. П.* Автоматизация управления мультимодальными перевозками / А. П. Нырков, С. С. Соколов, В. Н. Ежгуров, В. А. Мальцев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 2. — С. 74–78.
10. *Соловьев Ю. А.* Спутниковая навигация и ее приложения / Ю. А. Соловьев. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 326 с.
11. *Вайгандт Н. Ю.* Повышение точности навигационных систем водного транспорта при помощи технологии референчных станций / Н. Ю. Вайгандт, А. П. Нырков // Материалы науч.-техн. конф. ИТ: ВЧЕ-РА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА — 2013. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — С. 64–69.
12. *Нырков А.* Оценка погрешности коррелированных навигационных измерений / А. Нырков, А. Черненко // Речной транспорт (XXI век). — 2009. — № 5 (41). — С. 71–75.
13. *Chernyi S.* Self-contained drilling rig automatic control system efficiency improvement by means of assuring compatibility and integration methods development / S. Chernyi, A. Zhilenkov, S. Sokolov, L. Titov // Metallurgical and Mining Industry. — 2015. — Vol. 7. — № 3. — Pp. 66–73.
14. *Nyrkov A.* Using information technologies in dredging / A. Nyrkov, S. Sokolov, S. Chernyi, D. Mamunts // Metallurgical and Mining Industry. — Vol. 7. — № 6. — 2015. — Pp. 521–524.
15. ГЛОНАСС — для всех и повсюду. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.marcomm.ru/news/ID_13.html. (дата обращения: 18.11.2015).
16. Спутниковые системы навигации. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.fcp-pbdd.ru/special_equipment/20042. (дата обращения: 18.11.2015).

17. Спутники китайской навигационной системы BeiDou (Compass). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://monitoring-gps.ru/news/beidou\(compass\).html](http://monitoring-gps.ru/news/beidou(compass).html) (дата обращения: 18.11.2015).
18. Нырков А. П. Программно-аппаратные средства дифференциальных навигационных систем для расстановки знаков навигационного ограждения в ГБУ «Волго-Балт» / А. П. Нырков, Г. Б. Чистяков // Морская радиоэлектроника. — 2009. — № 2. — С. 34–36.
19. Викторов В. В. Точность навигационных параметров как фактор безопасности малого флота / В. В. Викторов, А. А. Капустин, А. П. Нырков // ИТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА — 2013: Материалы науч.-техн. конф. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — С. 89–93.
20. Чистяков Г. Б. Математическое и алгоритмическое обеспечение автоматизированного управления процессом высокоточной постановки средств навигационного ограждения на внутренних водных путях: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Г. Б. Чистяков. — СПб., 2010. — 164 с.
21. Руководство пользователя СМС «ВИКТОРИЯ». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://victoria.lrit.ru/index_rus/manual/vict_manual.pdf (дата обращения: 18.11.2015).
22. Инмарсат-С ТТ-302в. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.tecckom.ru/inmarsat_3020c.php (дата обращения: 18.11.2015).
23. Дифференциальный режим GPS измерений. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://geokart.3dn.ru/publ/2-1-0-6> (дата обращения: 18.11.2015).
24. Nyrkov A. P. Algorithmic Support of Optimization of Multicast Data Transmission in Networks with Dynamic Routing / A. P. Nyrkov, S. S. Sokolov, A. S. Belousov // Modern Applied Science. — 2015. — Vol. 9. — №. 5. — Pp. 162–176. DOI: 10.5539/mas.v9n5p162.
25. Нырков А. П. Мультисервисная сеть транспортной отрасли / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. С. Белоусов // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 4. — С. 33–38. DOI: 10.14489/vkit.2014.04. — Р. 033–038.
26. Дулатов И. Н. Современное состояние навигационных информационных систем / И. Н. Дулатов, А. П. Нырков // Материалы V межвузовской науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 14 мая 2014 г. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2014. — С. 265–269.
27. Викулин П. В. Построение траектории расхождения судов при использовании данных АИС // XXI науч.-техн. конф. 6 – 7 апреля 2010 г. Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы, подготовка специалистов. — Ч. III. — Петродворец: ВМИРЭ имени А. С. Попова, 2010. — С. 40–46.
28. Викулин П. В. Структурно-логический синтез информационных потоков АСУДС в условиях использования автоматической идентификационной системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / П. В. Викулин. — СПб., 2011. — 141 с.
29. Нырков А. П. Обеспечение безопасности объектов информатизации транспортной отрасли / А. П. Нырков, А. А. Нырков, С. С. Соколов [и др.]. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2015. — 544 с.
30. Каторин Ю. Ф. Защищенность информации в каналах передачи данных в береговых сетях автоматизированной идентификационной системы / Ю. Ф. Каторин, В. В. Коротков, А. П. Нырков // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 98–102.
31. Нырков А. П. Автоматизированное управление высокоточной постановкой средств навигационного ограждения на ВВП РФ с использованием ГЛОНАСС / А. П. Нырков, О. В. Петриева, Г. Б. Чистяков [и др.] // Материалы XIX науч.-техн. конф. «Методы и технические средства обеспечения безопасности информации». — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. — С. 44–45.
32. Вихров Н. М. О безопасности инфраструктуры водного транспорта / Н. М. Вихров, Ю. Ф. Каторин, А. П. Нырков [и др.] // Морской вестник. — 2014. — № 4 (52). — С. 99–102.
33. Жиленков А. А. Оценка надёжности и эффективности распределённых систем буровых установок / А. А. Жиленков, А. П. Нырков, С. Г. Черный // Автоматизация в промышленности. — 2015. — № 6. — С. 50–52.
34. Нырков А. П. Автоматизированное управление транспортными системами / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. А. Шнуренко. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 325 с.

A REVIEW OF THE TECHNICAL MEANS AND METHODS OF SATELLITE NAVIGATION SHIPS

This article reviews the methods of navigation based on satellite positioning. This method involves the creation of an integrated system of satellites in low earth orbit, upgrading of vessels and their navigation equipment,

the training of seafarers and service staff and elimination of impeding the implementation factors. The article considers the options of satellite navigation in the world, provides an assessment of all available satellite navigation systems on the number of satellites and prevalence in the world. Describes the principle of operation used in satellite navigation systems based on the receivers GLONASS/GPS systems SMS «Victoria», which compare the periods between the times of reception of synchronized signals from navigation satellites. The article provides a formula to calculate the GPS coordinates of the object on which all navigation receivers. The article describes the area of satellite coverage based on Inmarsat terminals. To increase the accuracy of determining the coordinates of a ship is the principle of operation of differential navigation satellite systems GLONASS/GPS. Collectively, the widespread adoption of satellite navigation systems with a well-designed and developed technical base should eventually bring the system to the planned capacity for global monitoring of ships traffic.

Keywords: Navigation, satellite, ships, GPS, GLONASS, Inmarsat, SMS «Victoria».

REFERENCES

1. Nyrkov, A. P., and G. B. Chistiakov. "The navigation system DGLONASS/DGPS in the safety of navigation." *Proc. of the Intern. scientific and practical Conf. dedicated to the 200th anniversary of the training for water transport of Russia "Russian Waterways: construction, operation, management"*. SPb.: FGOU VPO SPGUWC, 2009: 89–92.
2. Nyrkov, A. P., and G. B. Chistiakov. "Modern information technology to ensure the safety of navigation." *Coll. tr. Seventh International Scientific and Practical Conference "Research, development and application of high technologies in the industry"*. SPb.: Publishing House of the Polytechnic. University Press, 2009: 198–202.
3. Nyrkov, A. P., and A. A. Nyrkov. "Information technology to ensure the safety of navigation on inland waterways." *Materials of the conference "The XIV St. Petersburg International Conference" Regional Informatics - 2014 "(RI-2014)"*. SPb.: SPOISU 2014: 279.
4. Mamunts, D. G., S. S. Sokolov, and A. P. Nyrkov. "Using information technologies in dredging." *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 91 (2015): 012064. DOI:10.1088/1757-899X/91/1/012064
5. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, A. A. Zhilenkov, and S. G. Black. "Controlling performance of offshore drilling platforms waters of the Crimean peninsula in the sanctions regime." *Construction of oil and gas wells on land and at sea* 12 (2015): 11–17.
6. Nyrkov, A. P., and P. V. Vikulin. "Algorithm for traffic management, reaching intersecting courses." *Journal of University of Water Communications* 1 (2011): 100–105.
7. Nyrkov, A. P., and N. Y. Vaygandt. "Data integrity control in the transport monitoring." *Journal of University of Water Communications* 1 (2013): 54–61.
8. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and N. Y. Vaygandt. "Ensuring the safety of automated systems for traffic management using technology reference stations." *Marine electronics* 2 (2013): 48–50.
9. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, V. N. Ezhgurov, and V. A. Maltsev. "Automation of management multimodal transport." *Journal of University of Water Communications* 2 (2013): 74–78.
10. Soloviev, Yuri. *Satellite navigation and its applications*. M.: Eco-Trendz, 2003.
11. Vaygandt, N. Y., and A. P. Nyrkov. "Improved accuracy of navigation systems of water transport using technology reference stations." *Materials of scientific and engineering. Conf. "IT: Yesterday, Today and Tomorrow – 2013"*. SPb.: GUMRF imeni admiral S.O. Makarova, 2013: 64–69.
12. Nyrkov, A., and A. Chernenko. "Error estimation correlated navigational measurements." *River transport (XXI century)* 5 (2009): 71–75.
13. Chernyi, S., A. Zhilenkov, S. Sokolov, and L. Titov. "Self-contained drilling rig automatic control system efficiency improvement by means of assuring compatibility and integration methods development." *Metallurgical and Mining Industry* 7.3 (2015): 66–73.
14. Nyrkov, A., S. Sokolov, S. Chernyi, and D. Mamunts. "Using information technologies in dredging." *Metallurgical and Mining Industry* 7.6 (2015): 521–524.
15. GLONASS for everyone, everywhere. Web. 18 Nov. 2015 <[http:// www.marcomm.ru/news/ID_13.html](http://www.marcomm.ru/news/ID_13.html)>.
16. Satellite navigation systems. Web. 18 Nov. 2015 <http://www.fcp-pbdd.ru/special_equipment/20042>.
17. Sputniks of Chinese navigation system BeiDou (Compass). Web. 18 Nov. 2015 <[http://monitoring-gps.ru/news/beidou\(compass\).html](http://monitoring-gps.ru/news/beidou(compass).html)>.
18. Nyrkov, A. P., and G. B. Chistiakov. "Firmware differential navigation systems for the installation of signs to navigation in GBU "Volga-Balt"." *Marine electronics* 2 (2009): 34–36.

19. Viktorov, V. V., A. A. Kapustin, and A. P. Nyrkov. "The accuracy of navigation parameters as a safety factor of small fleet." *Materials of scientific and engineering. Conf. "IT: Yesterday, Today and Tomorrow – 2013"*. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2013: 89–93.
20. Chistiakov, G. B. Mathematical and algorithmic support of the automated process control precision setting aids to navigation on inland waterways: PhD diss. (Tech.). SPb., 2010.
21. User SMS "VICTORIA". Web. 18 Nov. 2015 <http://victoria.lrit.ru/index_rus/manual/vict_manual.pdf>.
22. Inmarsat-C TT-302B. Web. 18 Nov. 2015 <http://www.teccom.ru/inmarsat_3020c.php>.
23. Differential GPS survey. Web. 18 Nov. 2015 <<http://geokart.3dn.ru/publ/2-1-0-6>>.
24. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. S. Belousov. "Algorithmic support of optimization of multicast data transmission in networks with dynamic routing." *Modern Applied Science* 9.5 (2015): 162–176. DOI: 10.5539/mas.v9n5p162.
25. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. S. Belousov. "Multiservice Network of Transportation Industry." *Vestnik kompiuternykh i informatsionnykh tekhnologii (Herald of computer and information technologies)* 4 (2014): 33–38. DOI: 10.14489/vkit.2014.04.pp.033–038.
26. Dulatov, I. N., and A. P. Nyrkov. "The current state of navigation information systems." *Proc. of the V Interuniversity scientific conference of graduate students, students and cadets "Modern tendencies and prospects of development of water transport of Russia"*. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2014: 265–269.
27. Vikulin, P. V. "Building a difference path of vessels using AIS data." *Proc. of the XXI Scientific Conf. "Military radio electronics: experience and problems of use, training" Part III 6-7 April 2010*. Petrodvorets: VMIRE imeni A. S. Popov, 2010: 40–46.
28. Vikulin, P. V. Structurally-logic synthesis of information flow of ACMN in terms of use of the Automatic Identification System: PhD diss. (Tech.). SPb., 2010.
29. Nyrkov, A. P., A. A. Nyrkov, S. S. Sokolov, and A. A. Shnurenko. *Securing objects of information transport industry*. SPb.: Publishing House of the Polytechnic. University Press, 2015.
30. Katorin, Ju. F., V. V. Korotkov, and A. P. Nyrkov. "Information security in the channels of data transmission on the waterside networks of automatic identification system." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikacij* 1 (2012): 98–102.
31. Nyrkov, A. P., O. V. Petrieva, G. B. Chistyakov, et al. "Automated control of high-precision formulation aids to navigation in the Russian GDP using GLONASS." *Proc. of the XIX Scientific Conf. "Methods and technical tools of information security"*. SPb.: Publishing House of the Polytechnic. University Press, 2010: 44–45.
32. Vikhrov, N. M., Ju. F. Katorin, A. P. Nyrkov, et al. "On the safety of water transport infrastructure." *Maritime Bulletin* 4 (2014): 99–102.
33. Zhilenkov, A. A., A. P. Nyrkov, and S. G. Chernyi. "Evaluation of reliability and efficiency of distributed systems rigs." *Automation in the industry* 6 (2015): 50–52.
34. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. A. Shnurenko. *Automated management of transport systems*. SPb.: Publishing House of the Polytechnic. University Press, 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеев Алексей Александрович — аспирант.
Научный руководитель:
Нырко́в Анато́лий Па́влович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
lesha.matweew@yandex.ru, kaf_koib@gumrf.ru
Кузнецов Влади́мир Никола́евич — аспирант.
Научный руководитель:
Нырко́в Анато́лий Па́влович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_koib@gumrf.ru
Гаскаров Вагиз Дильяурович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf.koib@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matveev Aleksey Aleksandrovich — Postgraduate.
Supervisor:
Nyrkov Anatolij Pavlovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
lesha.matweew@yandex.ru, kaf_koib@gumrf.ru
Kuznetsov Vladimir Nikolaevich — Postgraduate.
Supervisor:
Nyrkov Anatolij Pavlovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
ponen@yandex.ru
Gaskarov Vagiz Dilyaurovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
kaf.koib@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2015 г.

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСПОЛНЯЕМЫХ ФАЙЛОВ ПО ИХ СИГНАТУРАМ

В статье рассматривается метод защиты программных средств автоматизированных информационных систем на речном и морском транспорте на основе идентификации исполняемых elf-файлов программ, установленных на различных Linux ОС, по их сигнатурам специальной структуры. Под идентификацией следует понимать процесс распознавания некоторого файла как его отождествление с той или иной программой. Многообразие ОС Linux и открытость их исходного кода затрудняют использование стандартных методов анализа и инвентаризации исполняемых файлов. Предлагается новый метод решения этой задачи, который включает три этапа: построение архива сигнатур; фильтрация сигнатур; непосредственная идентификация файла. Сигнатуры как включаемых в архив программ, так и идентифицируемых файлов, имеют специальную структуру, основанную на частотных характеристиках. Фильтрация сигнатур осуществляется с использованием критерия Фишера (ϕ^ -критерия) на уровне значимости $p=0,01$. Для более точной идентификации выполняется анализ частотных характеристик сигнатур, хранящихся в архиве, и сигнатур, полученных в результате фильтрации, по значению углового коэффициента при уровне различия менее 20 %.*

Ключевые слова: информационная безопасность; исполняемый elf-файл; сигнатура файла; статистический критерий Фишера (ϕ^* -критерий); идентификация файлов.

Введение

В соответствии с Федеральным законом от 09.02.2007 г. № 16-ФЗ «О транспортной безопасности», целями обеспечения транспортной безопасности являются устойчивое и безопасное функционирование транспортного комплекса, а также защита интересов личности, общества и государства в сфере транспортного комплекса от актов незаконного вмешательства. Защита программно-технических средств информатизации на морском и речном транспорте от преднамеренных или непреднамеренных воздействий осуществляется путем разработки и реализации мер по обеспечению транспортной безопасности, контроля и надзора в области обеспечения транспортной безопасности, а также с помощью использования посредством информационного, материально-технического и научно-технического обеспечения транспортной безопасности.

Для обеспечения информационной безопасности (ИБ) на морском и речном транспорте применяются организационные, правовые и технические меры, создаются системы обеспечения безопасности мореплавания, которые, как и суда, имеют автоматизированные информационные системы, нуждающиеся в защите. Такие системы могут подвергнуться угрозам, эксплуатирующим уязвимость программного обеспечения (например, дефекты в программе, не декларированные возможности, нелегальное использование интеллектуальной собственности [1], [2], включение в программы вредоносного кода [3] и т. д.), что приводит к увеличению рисков ИБ. Таким образом, одной из основных задач в обеспечении информационной безопасности автоматизированных информационных систем на морском и речном транспорте является инвентаризация содержимого компьютерных систем с целью выявления несанкционированно установленных программных продуктов [4].

В настоящее время существует большое количество программных [5] – [8] и аппаратных [5], [6] продуктов анализа компьютерных систем с функцией аудита, а также методов анализа видеофайлов [9] – [11] и фотографий [12] – [14], на основе которых разрабатываются методы исследования исполняемых файлов. Но большинство из них рассчитаны на операционную систему Windows, в то время как все более широкое распространение получают Linux-системы.

Исполняемые файлы для Windows систем представлены уже в конечном (скомпилированном) виде. Для Linux систем известны несколько способов по установке исполняемых файлов [15].

Принимая во внимание многообразие операционных систем Linux и открытость их исходного кода, необходимо учитывать частоту выхода обновлений как самих операционных систем, так и программ для них. Такие особенности операционных систем Linux затрудняют использование следующих стандартных методов анализа и инвентаризации исполняемых файлов:

- ручной осмотр характерных мест установки программ;
- побайтовое сравнение;
- сравнение контрольной суммы;
- сравнение цифровой подписи;
- методы, представленные в других статьях: аудит программного обеспечения при помощи кусочного хеширования [16], определение кражи программного обеспечения при помощи идентификации программы через последовательность команд [17], осуществление поиска по двоичному коду [18], идентификация типов данных и применение статистического анализа [19], идентификация мультимедийных файлов [20].

Следовательно, актуальной является задача разработки такого метода идентификации исполняемых elf-файлов [21], при котором будет происходить их распознавание вне зависимости от версии или операционной системы Linux, на которой они расположены. Под идентификацией в данной работе следует понимать процесс распознавания некоторого файла как его отождествление с той или иной программой. Предлагается новый подход к решению этой задачи.

Объектом исследования в настоящей работе являются исполняемые файлы формата elf и их сигнатуры, предметом исследования — способы сравнения сигнатур исполняемых файлов. Целью исследования является разработка метода идентификации elf-файлов на основе анализа их сигнатур. Предлагаемый метод включает три этапа:

- построение архива сигнатур;
- фильтрация сигнатур;
- непосредственная идентификация файла.

Построение архива сигнатур. Для того, чтобы построить сигнатуру программы, необходимо проанализировать определенный объем исполняемых файлов, отождествленных с этой программой. На основании такого анализа для различных имеющихся программ создаются сигнатуры, объединяемые в архив. Каждая программа представлена бинарным кодом, т. е. в терминах математической статистики измерение признака происходит в номинативно-дихотомической шкале, а выборкой является представление исполняемого файла в бинарном виде.

Для построения архива сигнатур формируется обучающая выборка (TS), состоящая из elf-файлов, отождествленных с определенной имеющейся программой, сигнатура которой впоследствии будет включена в архив. Обучающую выборку можно представить в следующем виде:

$$TS = \{v_1, v_2, \dots, v_m\},$$

где v_i — выборка различных программ; m — количество различных программ; $v_i = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$; f_j — различные версии i -й программы; n — количество файлов в выборке.

Для построения сигнатуры i -й программы подсчитываются частоты нулей и единиц для каждого файла в выборке, а именно: $f_j = \{z, o\}$, где z — количество нулей, o — количество единиц.

На основании этих данных для каждой из программ используется формула

$$v_i = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n f_j \{z, o\}. \quad (1)$$

По формуле (1) вычисляются средние частоты нулей и единиц $\bar{v}_i = \{\bar{z}, \bar{o}\}$, где $\bar{z}$ — средние значения количества нулей; $\bar{o}$ — средние значения количества единиц, n — количество файлов в выборке.

Далее необходимо учитывать более индивидуальные характеристики каждого файла. Для этого нужно разбить исполняемый файл на части по одному байту.

Для каждого файла f_j рассчитывается побайтовая частотная характеристика и вычисляется усредненная частотная характеристика для различных версий i -й программы. Таким образом, получаем строку, состоящую из 256 значений:

$$\bar{L}_i = \{b_0, b_1, \dots, b_{255}\},$$

где b_j — частота j -го байта.

Составление сигнатуры для каждой i -й программы происходит по следующей схеме:

- 1) имя программы — одна ячейка;
- 2) среднее количество нулей и единиц — две ячейки;
- 3) частотное распределение байт — 256 ячеек.

Таким образом, сигнатура S_i программы в архиве будет иметь следующую структуру:

$$S_i = \{N_i, \bar{v}_i, \bar{L}_i\},$$

где N_i — имя программы, и будет состоять из 259 ячеек. При этом отводимое количество памяти для каждой из ячеек может быть различным.

Особо отметим, что построение сигнатуры S идентифицируемого файла происходит по аналогичной схеме:

$$S = \{f, L\},$$

где f — частота нулей и единиц бинарного кода файла;

L — побайтовая частотная характеристика.

Фильтрация сигнатур. Данный этап представляет собой отсеивание сигнатур файлов, значительно отличающихся от сигнатур программ, помещенных в архив, и осуществляется с использованием многофункционального статистического критерия Фишера (ϕ^* -критерия). Поскольку критерий Фишера основывается на альтернативной шкале «есть признак — нет признака» [22, с. 158], одно лишь его применение не даст нужного результата — идентификации файла, однако с его помощью можно довольно быстро провести фильтрацию файлов.

Для сравнения двух сигнатур по критерию Фишера (ϕ^* -критерию) сформируем гипотезы:

H_0 — доля единиц в сигнатуре программы, хранящейся в архиве, не больше, чем в сигнатуре идентифицируемого файла;

H_1 — доля единиц в сигнатуре программы, хранящейся в архиве, больше, чем в сигнатуре идентифицируемого файла.

Основная гипотеза H_0 проверяется на уровне значимости $p = 0,01$ [23, с. 98]. Эмпирическая величина угла ϕ^* вычисляется по формуле

$$\phi_{\text{эм}}^* = (\phi_1 - \phi_2) \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}, \quad (2)$$

где углы $\phi_i = 2 \cdot \arcsin(\sqrt{P})$, где P — процентная доля значений признака, выраженная в долях единицы, при $\phi_1 > \phi_2$;

n_1, n_2 — суммарное количество значений признака в сигнатуре программы, хранящейся в архиве, и сигнатуре идентифицируемого файла соответственно.

Если при сравнении полученного значения $\phi_{\text{эм}}^*$ с критическим значением $\phi_{\text{кр}}^*$ выполняется неравенство $\phi_{\text{эм}}^* > \phi_{\text{кр}}^*$, то основная гипотеза H_0 отвергается и принимается гипотеза H_1 ; в противном случае принимается гипотеза H_0 .

Однако, как следует из формулы (2), при больших объемах выборок n_1 и n_2 происходит значительное увеличение значения ϕ^* , поэтому необходимо провести нормирование данных.

Нормирование значений количества нулей и единиц выполняется по формуле (3) [24]:

$$X = \frac{x_i D}{x_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где x_{max} — максимальное значение частот нулей или единиц в выборке;

x_i — частоты нуля и единицы соответственно (при $i = 0$ — частота нулей, при $i = 1$ — частота единиц);

D — константа нормирования. Опытным путем было принято $D = 1500$. Очевидно, что нормированные значения X будут принадлежать интервалу $[0, 1500]$.

Заметим, что в результате процедуры нормирования сохраняются процентные соотношения нулей и единиц в каждой выборке, но значительно уменьшается величина подкорневого выражения в формуле (2), однако это не влияет на величину углов φ_1 и φ_2 .

Таким образом, фильтрацию необходимо производить в двух случаях: при создании нового архива и при обновлении существующего.

Непосредственная идентификация файла. На этапе непосредственной идентификации файла производится сравнение побайтовых частотных характеристик сигнатур программ, хранящихся в архиве, и сигнатур файлов, полученных в результате фильтрации.

Рассмотрим процедуру непосредственной идентификации файла. Сравнение сигнатур происходит по следующему принципу: если частота j -го байта из распределения идентифицируемого файла отличается от частоты этого же байта в архиве сигнатур менее чем на 20 %, то значение переменной x_1 — «различие лежит в пределах 20 %», т. е. увеличивается на единицу. В противном случае на единицу увеличивается значение переменной x_2 , значит «различие не лежит в пределах 20 %». Значение уровня различия в 20 % определено опытным путем.

Далее через точки с координатами $(x_1, 0)$ и $(x_2, 0)$ проводится прямая и вычисляется ее угловой коэффициент k [25]. При значении $k \geq 0$ файл считается идентифицированным, в противном случае — не идентифицированным.

Таким образом, алгоритм идентификации файла заключается в следующем.

1. На вход подается идентифицируемый исполняемый файл формата elf.
2. Для файла подсчитываются частоты нулей и единиц f .
3. Файл разбивается на байты и строится побайтовая частотная характеристика L . Значения L и f формируют с 3-й по 258-ю ячейки сигнатуры идентифицируемого файла.
4. Значения $\bar{v}_i$ и f нормируются.
5. Выполняется первый этап — *фильтрация по критерию Фишера* (φ^* -критерию). При этом сравниваются только первая и вторая ячейки сигнатуры идентифицируемого файла со второй и третьей, соответственно, ячейками сигнатуры программы из архива.
6. Выполняется второй этап — *непосредственная идентификация*. При этом сравниваются частотные характеристики $\bar{L}_i$ и L с использованием ячеек с 3-й по 259-ю для сигнатуры программы из архива и использованием ячеек со 2-й по 258-ю в сигнатуре идентифицируемого файла.
7. В результате принимается решение о том, какая сигнатура из архива, в меньшей степени, отлична от сигнатуры идентифицируемого файла.

Постановка эксперимента по применению метода

Приведем результаты эксперимента, проведенного на основе алгоритма, описанного ранее.

Для эксперимента были использованы следующие разновидности Linux ОС (разрядность 64):

1. Debian
2. Mint
3. Korora

Для эксперимента были использованы следующие программы (разрядность 64):

1. aircrack-ng
2. gftp-gtk
3. gimp
4. htop
5. nmap

Архив сигнатур формировался на основе указанных программ в ОС Debian и Mint.

Тестовая выборка была сформирована из указанных программ на ОС Korora. Задача состояла в идентификации тестовой выборки с архивом сигнатур.

В табл. 1 приведены результаты фильтрации при уровне значимости $p < 0,01$.

Таблица 1

Фильтрация

Идентифицируемые файлы, версия	Программы из архива сигнатур	$\Phi^*_{\text{эмп}}$	Результат
Сравнение одинаковых программ			
aircrack-ng 1.1-8	$\Phi^*_{\text{эмп}}$	0,15	+
gftp-gtk 2.0.19-10	gftp-gtk	0,025	+
gimp 2.8	gimp	0,64	+
gimp 2.8.8-3	gimp	0,64	+
htop 1.0.2-3	htop	0,8	+
nmap 6.40-2	nmap	0,017	+
Сравнение различных программ			
aircrack-ng 1.1-8	htop	3,51	-
gftp-gtk 2.0.19-10	gimp	0,7	+
gftp-gtk 2.0.19-10	aircrack-ng	0,64	+
gimp 2.8	htop	2,66	-
gimp 2.8	gftp-gtk	1,31	+
gimp 2.8.8-3	nmap	3,73	-
htop 1.0.2-3	nmap	1,86	+
nmap 6.40-2	aircrack-ng	4,4	-

Примечания. 1. В первом столбце табл. 1 представлены файлы, установленные на операционной системе Korog. 2. В столбце «Результат» символ «+» означает, что гипотеза H_0 принимается, символ «-» означает, что гипотеза H_0 отвергается.

Из табл. 1 следует, что при сравнении сигнатур заведомо одинаковых программ отсеивания не происходит, при этом при сравнении сигнатур заведомо различных программ не все программы, отличные от программ в архиве, были отфильтрованы.

В табл. 2 приведены результаты непосредственной идентификации.

Таблица 2

Проверка частотных распределений

Идентифицируемые файлы, версия	Программы из архива сигнатур	Угловой коэффициент	Результат
Сравнение одинаковых программ			
aircrack-ng 1.1-8	aircrack-ng	8,6	+
gftp-gtk 2.0.19-10	gftp-gtk	2,6	+
gimp 2.8	gimp	6,4	+
gimp 2.8.8-3	gimp	8,4	+
htop 1.0.2-3	htop	3,6	+
nmap 6.40-2	nmap	24,8	+
Сравнение различных программ			
gftp-gtk 2.0.19-10	gimp	-25,6	-
gftp-gtk 2.0.19-10	aircrack-ng	-25,6	-
gimp 2.8	gftp-gtk	-22,2	-
htop 1.0.2-3	nmap	-25,6	-

Примечания: 1. В первом столбце табл. 2 представлены файлы, установленные на операционной системе Korog. 2. В столбце «Результат» символ «+» означает, что файл идентифицирован как программа из архива сигнатур (второй столбец), символ «-» означает, что файл не идентифицирован.

Из табл. 2 следует, что при сравнении сигнатур заведомо одинаковых программ файлы идентифицировались верно, как совпадающие с программой в архиве. Аналогично, при сравнении сигнатур различных программ все файлы идентифицированы верно, как несовпадающие с программой в архиве.

Заключение

При разработке метода построения сигнатур рассматривается elf-формат файлов и закономерности в их бинарном коде. Для построения сигнатуры файлов и идентификации файлов применяются математические методы обработки данных, такие как статистический критерий Фишера (ϕ^* -критерий), побайтовая частотная характеристика файлов и угловой коэффициент.

На рис. 1 представлено графическое отображение результатов фильтрации, приведенных в табл. 1. В полуплоскости, соответствующей значению коэффициента Фишера $\phi^*_{\text{эмп}} > 2,31$ ($p < 0,01$), находятся программы, сигнатуры которых отфильтровались; напротив, в полуплоскости $\phi^*_{\text{эмп}} < 2,31$ находятся программы, перешедшие на этап непосредственной идентификации.

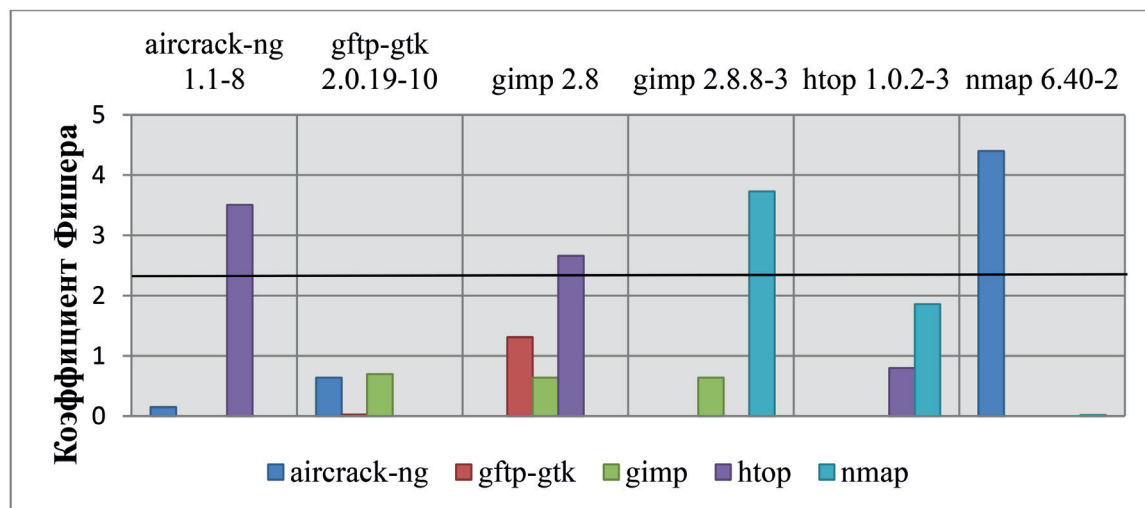


Рис. 1. Значения коэффициента Фишера при сравнении сигнатур

На рис. 2 представлено графическое отображение результатов идентификации сигнатур программ, приведенных в табл. 2. В полуплоскости $k \geq 0$ находятся программы, сигнатуры которых идентифицированы с сигнатурами программ в архиве.

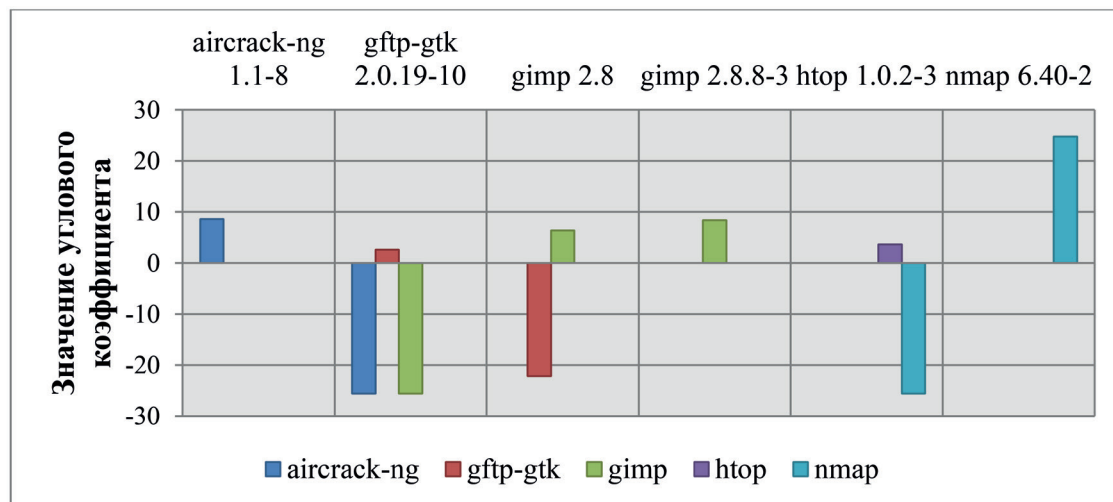


Рис. 2. Значения угловых коэффициентов при сравнении сигнатур

К достоинствам рассматриваемого метода можно отнести его способность идентифицировать файлы программ независимо от их версий и операционной системы Linux, на которой они установлены, простоту реализации и скорость выполнения задачи. Однако требуется увеличение архива сигнатур, усовершенствование самих сигнатур, включение дополнительных функций (например, такой, как способность к определению версии файла), а также анализ применения метода на больших объемах данных.

Тем не менее, результаты эксперимента подтверждают возможность применения метода для анализа содержимого компьютерных систем с целью выявления несанкционированно установленных программных продуктов в информационных системах на морском и речном транспорте, а также идентификации пользователя на основе данных, хранящихся на некотором носителе. Таким образом, представленный метод может быть использован в контрольных мероприятиях как техническое средство защиты, призванное устранить недостатки организационных мер, например, осуществлять контроль над исполнением установленной политики безопасности, а также при расследовании инцидентов ИБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krsul I.* Authorship analysis: identifying the author of a program / I. Krsul, E. H. Spafford // *Computers & Security*. — 1997. — Vol. 16. — № 3. — Pp. 233–257. DOI:10.1016/S0167-4048(97)00005-9.
2. *Rosenblum N.* Who wrote this code? identifying the authors of program binaries / N. Rosenblum, X Zhu, B. P. Miller // *Computer Security—ESORICS 2011*. — Springer Berlin Heidelberg, 2011. — Pp. 172–189.
3. *Bai J.* Malware detection through mining symbol table of Linux executables / J. Bai, Y. Yang, S. Mu, Y. Ma // *Information Technology Journal*. — 2013. — Vol. 12. — Is. 2. — Pp. 380–384. DOI: 10.3923/itj.2013.380.384.
4. *McKemmish R.* What is Forensic Computing? / R. McKemmish // *Trends and Issues in Crime and Criminal Justice*. — 1999. — No. 118. — Pp. 1–6.
5. Belkasoft Evidence Center. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ru.belkasoft.com/ru/> (дата обращения — 08.05.2015).
6. EnCase Forensic Guidance Software. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.guidancesoftware.com> (дата обращения — 08.05.2015).
7. Forensic Toolkit (FTK) AccessData. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://accessdata.com> (дата обращения — 08.05.2015).
8. *Brian C.* The sleuth kit and autopsy: Forensics tools for Linux and other Unixes. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.sleuthkit.org/index.php> (дата обращения — 08.05.2015).
9. *Gloe T.* Forensic analysis of video file formats / T. Gloe, A. Fischer, M. Kirchner // *Digital Investigation*. — 2014. — Vol. 11. — Pp. S68–S76. DOI: 10.1016/j.diin.2014.03.009.
10. *Wang W.* Exposing digital forgeries in video by detecting double MPEG compression / W. Wang, H. Farid // *Proceedings of the 8th workshop on Multimedia and security*. — ACM, 2006. — Pp. 37–47. DOI: 10.1145/1161366.1161375.
11. *Wang W.* Exposing digital forgeries in interlaced and deinterlaced video / W. Wang, H. Farid // *IEEE Trans Inf Forensics Security*. — 2007. — Vol. 2 — № 3. — Pp. 438–449. DOI:10.1109/TIFS.2007.902661.
12. *Kee E.* Digital image authentication from thumbnails / E. Kee, H. Farid // *SPIE Symposium on Electronic Imaging*. — San Jose, CA, 2010.
13. *Kee E.* Digital image authentication from JPEG headers / E. Kee, M. K. Johnson, H. Farid // *IEEE Trans Inf Forensics Security*. — 2011. — Vol. 6 — № 3. — Pp. 1066–1075 DOI: 10.1109/TIFS.2011.2128309.
14. *Popescu A. C.* Statistical tools for digital forensics / Popescu A., Farid H. // *Information Hiding*. — Springer Berlin Heidelberg, 2005. — Pp. 128–147. DOI: 10.1007/978-3-540-30114-1_10.
15. *Хухин Р.* Установка программ в Linux. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.opennet.ru/docs/RUS/linux_beg_fa/Linux-FAQ-7.html (дата обращения — 9.04.2015).

16. *Shved V.* The method of an audit of software containing in digital drives / V. Shved, P. Kuzmich, V. Korzhuk // Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2014 IEEE 8th International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICAICT.2014.7035927.
17. *Myles G.* K-gram based software birthmarks / G. Myles, C. Collberg // Proceedings of the 2005 ACM symposium on Applied computing. — ACM, 2005. — Pp. 314–318. DOI:10.1145/1066677.1066753.
18. *Khoo W. M.* Rendezvous: A search engine for binary code / W. M. Khoo, A. Mycroft, R. Anderson // Proceedings of the 10th Working Conference on Mining Software Repositories. — IEEE Press, 2013. — Pp. 329–338. DOI: 10.1109/MSR.2013.6624046.
19. *Moody S. J.* Sádi-statistical analysis for data type identification / S. J. Moody, R. F. Erbacher // Systematic Approaches to Digital Forensic Engineering, 2008. SADFE'08. Third International Workshop on. — IEEE, 2008. — Pp. 41–54. DOI: 10.1109/SADFE.2008.13.
20. *Haggerty J.* FORSIGS: Forensic Signature Analysis of the Hard Drive for Multimedia File Fingerprints / J. Haggerty, M. Taylor // IFIP TC11 International Information Security Conference. — Boston: Springer, 2006. DOI: 10.1007/978-0-387-72367-9_1.
21. Executable and linkable format. 2014.[Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://wiki.osdev.org/ELF> (дата обращения — 9.04.2015).
22. *Сидоренко Е. В.* Методы математической обработки в психологии / Е. В. Сидоренко. — СПб.: Речь, 2010. — 350 с.
23. *Наследов А. Д.* Математические методы психологического исследования. Анализ и интерпретация данных: учеб. пособие; 3-е изд. / А. Д. Наследов. — СПб.: Речь, 2008. — 392 с.
24. *Брылевская Л. И.* Элементы теории линейных пространств: учеб. пособие / Л. И. Брылевская, И. А. Лапин, Л. С. Ратафьева, О. Л. Суслина. — СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2001. — 140 с.
25. *Clapham C.* Oxford Concise Dictionary of Mathematics, Gradient / C. Clapham, J. Nicholson. — Addison-Wesley, 2009. — 876 p.

METHOD OF EXECUTABLE FILTS IDENTIFICATION BY THEIR SIGNATURES

The paper deals with the method of protecting software automated information systems at river and sea transport by identification executable elf-files installed on various Linux distributions by their specific structural signatures. Identifying here should be understood as the process of file recognition by establishing its coincidence with a particular program. The variety of Linux distributions and their open source codes make it difficult to use standard methods of executable files analysis and inventory. A new approach to solving this problem is given in the article.

The objects of study in this paper are elf-files and their signatures. Subject of research is methods of signature files comparing. The main aim is to develop a method of elf-files identification by their signatures analyses.

The proposed method consists of three main stages:

- acquisition of signatures' library;
- signatures' filtering;
- file identification.

Signatures, both included in the programs' archive and identified files, has a special structure, which is based on the frequency characteristics.

Signatures' filtering is performed using Fisher's ratio test at a significance level of $p=0,01$.

For more accurate identification, an analysis of the signatures frequency characteristics, which are stored in the library, and the signatures, which are obtained by filtration, is held by the value of the slope at the level less than 20 % different.

Keywords: information security; executable elf-file; signature file; Fisher's ratio test; files identification.

REFERENCES

1. Krsul, Ivan, and Eugene H. Spafford. "Authorship analysis: Identifying the author of a program." *Computers & Security* 16.3 (1997): 233–257. DOI:10.1016/S0167-4048(97)00005-9.

2. Rosenblum, Nathan, Xiaojin Zhu, and Barton P. Miller. "Who wrote this code? identifying the authors of program binaries." *Computer Security–ESORICS 2011*. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 172–189.
3. Bai, J., Y. Yang, S. Mu, and Y. Ma. "Malware detection through mining symbol table of Linux executables." *Information Technology Journal* 12.2 (2013): 380–384. DOI: 10.3923/itj.2013.380.384.
4. McKemmish, R. "What is Forensic Computing?" *Trends and Issues in Crime and Criminal Justice* 118 (1999): 1–6.
5. Belkasoft Evidence Center. Web. 8 May 2015 <<http://ru.belkasoft.com/ru/>>.
6. EnCase Forensic Guidance Software. Web. 8 May 2015 <<https://www.guidancesoftware.com/>>.
7. Forensic Toolkit (FTK) AccessData. Web. 8 May 2015 <<http://accessdata.com/>>.
8. Brian, C. The sleuth kit and autopsy: Forensics tools for Linux and other Unixes. Web. 8 May 2015 <<http://www.sleuthkit.org/index.php>>.
9. Gloe, T., A. Fischera, and M. Kirchner. "Forensic analysis of video file formats." *Digital Investigation* 11 (2014): 68–76. DOI: 10.1016/j.diin.2014.03.009.
10. Wang, W., and H. Farid. Exposing digital forgeries in video by detecting double MPEG compression. *Proceedings of the 8th workshop on Multimedia and security*. NY, USA: ACM, 2006. DOI: 10.1145/1161366.1161375.
11. Wang, W., and H. Farid. "Exposing digital forgeries in interlaced and deinterlaced video." *IEEE Trans Inf Forensics Security* (2007): 438–449. DOI:10.1109/TIFS.2007.902661
12. Kee, E., and H. Farid. "Digital Image Authentication from Thumbnails." *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (2010).
13. Kee, E., M. K. Johnson, and H. Farid. "Digital Image Authentication from JPEG Headers." *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 6.3 PART 2 (2011): 1066–1075 DOI: 10.1109/TIFS.2011.2128309.
14. Popescu, Alin C., and Hany Farid. "Statistical tools for digital forensics." *Information Hiding*. Springer Berlin Heidelberg, 2005. DOI 10.1007/978-3-540-30114-1_10.
15. Khikhin R. Ustanovka programm v Linux. Web. April 9, 2015 http://www.opennet.ru/docs/RUS/linux_beg_faq/Linux-FAQ-7.html.
16. Shved, Viktor, Pavel Kuzmich, and Viktoria Korzhuk. "The method of an audit of software containing in digital drives." *Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2014 IEEE 8th International Conference on*. IEEE, 2014: 1–5. DOI: 10.1109/ICAICT.2014.7035927.
17. Myles, Ginger, and Christian Collberg. "K-gram based software birthmarks." *Proceedings of the 2005 ACM symposium on Applied computing*. ACM, 2005. DOI:10.1145/1066677.1066753.
18. Khoo, Wei Ming, Alan Mycroft, and Ross Anderson. "Rendezvous: A search engine for binary code." *Proceedings of the 10th Working Conference on Mining Software Repositories*. IEEE Press, 2013. DOI: 10.1109/MSR.2013.6624046.
19. Moody, Sarah J., and Robert F. Erbacher. "Sádi-statistical analysis for data type identification." *Systematic Approaches to Digital Forensic Engineering, 2008. SADFE'08. Third International Workshop on*. IEEE, 2008. DOI: 10.1109/SADFE.2008.13.
20. Haggerty, John, and Mark Taylor. "FORSIGS: Forensic Signature Analysis of the Hard Drive for Multimedia File Fingerprints." *IFIP TC11 International Information Security Conference*. 2006. DOI: 10.1007/978-0-387-72367-9_1.
21. Executable and linkable format. Web. 9 April 2015. <<http://wiki.osdev.org/ELF>>.
22. Sidorenko, E. V. *Metody matematicheskoy obrabotki v psikhologii*. SPb.: Rech Publ., 2010.
23. Nasledov, A. D. *Matematicheskie metody psikhologicheskogo issledovaniya. Analiz i interpretatsiya dannykh. Uchebnoe posobie*. SPb.: Rech Publ., 2008.
24. Brylevskaya, L. I., I. A. Lapin, L. S. Rataf'eva, and O. L. Suslina. *Elementy teorii lineynykh prostranstv. Uchebnoe posobie*. SPb.: ITMO, 2001.
25. Clapham, C., and J. Nicholson. "Oxford Concise Dictionary of Mathematics, Gradient." Addison-Wesley, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кривцова Ирина Евгеньевна —
старший преподаватель.
Санкт-Петербургский университет
информационных технологий, механики и оптики
ikr@cit.ifmo.ru
Салахутдинова Ксения Иркиновна —
соискатель.
Санкт-Петербургский университет
информационных технологий, механики и оптики
kainagr@mail.ru
Юрин Игорь Валентинович —
кандидат военных наук, доцент.
Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С.О. Макарова.
9402015@mail.ru, kaf_koib@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Krivtsova Irina Evgen'evna —
Senior Lecturer.
Saint Petersburg University of Information
Technologies, Mechanics and Optics
ikr@cit.ifmo.ru
Salakhutdinova Kseniya Irkinovna —
applicant.
Saint Petersburg University of Information
Technologies, Mechanics and Optics
kainagr@mail.ru
Yurin Igor Valentinovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping.
9402015@mail.ru, kaf_koib@gumrf.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи подготавливаются в текстовом редакторе Microsoft Word 2003 и представляются в печатном виде на одной стороне страницы формата А4 и в электронном — на любом носителе или по электронной почте. В тексте статьи устанавливается автоматическая расстановка переносов. Размер полей текста устанавливается равным 25 мм со всех сторон. Ориентация страниц — книжная. Текст набирается шрифтом Times New Roman.

Оформление статьи должно соответствовать следующим требованиям:

- УДК набираются прописными буквами полужирным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по левому краю;
- инициалы и фамилия автора (авторов) набираются строчными буквами полужирным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по правому краю. Ученая степень и ученое звание авторов (при наличии) — строчными буквами размером 11 pt с выравниванием по правому краю;
- полное название организации набирается строчными буквами обычным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по правому краю;
- название статьи на русском и английском языках набирается прописными буквами полужирным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по центру;
- аннотация и ключевые слова на русском и английском языках набираются строчными буквами курсивом размером 10 pt с выравниванием по ширине (аннотация 100–150 слов на русском языке, перевод на англ. языке, допускается расширенная аннотация на англ. языке (до 500 слов) или графическая аннотация);
- основной текст набирается строчными буквами размером 11 pt с выравниванием по ширине. Отступ первой строки — 1,25 см;
- статья обязательно должна содержать список используемой литературы (не менее 10–15 наименований по ГОСТ Р 7.0.5-2008), ссылки нумеруются в тексте статьи в порядке увеличения, рекомендуется использовать релевантные источники, ссылки на труднодоступные источники информации отклоняются, не рекомендуется использовать ссылки на литературу старше 10 лет;
- межстрочный интервал — одинарный;
- таблицы набираются в текстовом редакторе Microsoft Word. Над таблицей указывается ее номер, затем название;
- номер и название рисунков пишутся под ними;
- формулы набираются с помощью Math Type 6.0.

С требованиями по оформлению статей можно ознакомиться на официальном сайте журнала <http://journal.gumrf.ru>. На сайте также представлены полнотекстовые версии Вестника. Авторские экземпляры распространяются по подписке.

Направив в редакцию рукопись, автор подтверждает свое согласие на публикацию рукописи в открытой печати и на размещение в сети интернет в открытом доступе. В журнал автором направляются следующие материалы: текст статьи, анкета автора, одна внешняя рецензия, заверенная печатью организации (дополнительно для аспирантов — отзыв научного руководителя) и экспертное заключение. Все поступившие материалы проходят проверку в системе, реализующей технологию проверки текстовых документов на наличие заимствований «Антиплагиат». Редакция придерживается Кодекса этики научных публикаций (<http://publicet.org/code/>) и проявляет нетерпимость к плагиату.

Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы. Число авторов статьи — не более трех человек.

Предоставленные материалы первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются на рецензирование. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ. При отклонении материалов из-за нарушения требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются. Авторы статей несут полную ответственность за предоставленные материалы, в том числе за соблюдение правил публикации материалов в открытой печати.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов осуществляется бесплатно.

Электронный адрес редакции: journal@gumrf.ru

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Выпуск 1 (35)

2016 год

Выпускающие редакторы
Н. А. Карамзина, Т. В. Середова
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*
Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 25.02.16. Формат 60х90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 28,25. Тираж 500 экз. Заказ № 113/16

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7