

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА»

ВЕСТНИК

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

Выпуск 2 (36)

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2016

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2016. — Вып. 2 (36). — 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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ	7
<i>Смоленцев С. В.</i> Автоматический синтез решений по расхождению судов в море	7
<i>Дорожко В. М.</i> Оценка параметрической области опрокидывания контура морского судна на «волне-убийце»	16
<i>Галин А. В.</i> Разработка модели специализации порта на основе приоритета грузопотоков	27
<i>Решняк В. И., Батяев А. В., Решняк К. В.</i> Разработка системы управления экологической безопасностью судоходства	34
<i>Зуб И. В., Ежов Ю. Е.</i> Моделирование функционирования транспортного терминала вложенными сетями Петри	41
<i>Кубасов Р. В., Лупачев В. В., Попов М. В.</i> Условия жизнедеятельности экипажа на борту морского судна (обзор литературы)	49
<i>Русинов И. А., Гаврилова И. А., Нелогов А. Г.</i> Деятельность линейных конференций накануне принятия Конвенции ООН о Кодексе поведения линейных конференций	56
ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ	67
<i>Томсон П. В.</i> Разработка алгоритма вычисления геодезической широты в функции пространственных геоцентрических координат	67
<i>Чебан А. Ю.</i> Гидромеханизированная добыча строительных горных пород в бассейне реки Амур	73
<i>Елагин А. А., Демидов А. Л.</i> Анализ методов определения колебаний уровня моря при гидрографических работах	78
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА	90
<i>Безюков О. К., Макарьев Е. В., Махфуд Маад Мохаммед.</i> Исследование теплового баланса судового высокооборотного дизеля при его охлаждении водой и антифризом	90
<i>Кириллов Н. Г.</i> Экологические проблемы эксплуатации водного транспорта и первый опыт создания отечественного судна на сжиженном природном газе	98
<i>Жуков В. А., Яманин А. И.</i> Анализ алгоритмов расчета кинематики кривошипно-шатунных механизмов с прицепными шатунами	109
<i>Андреанов Е. Н., Иванов А. Н.</i> Общие вопросы проектирования схем конкурентоспособных распределительных механизмов крановых и судовых приводов	118
<i>Коптев А. В.</i> Теоретическое исследование обтекания цилиндра потоком идеальной несжимаемой среды при наличии экранирующего эффекта	127
<i>Глухих В. Н., Петров В. М., Сойту Н. Ю.</i> Определение постоянных упругости с учетом анизотропии свойств композиционных материалов, используемых для намотки ответственных оболочек и стержневых конструкций в судостроении и портовой инфраструктуре	137
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	143
<i>Саушев А. В., Широков Н. В.</i> Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметров их элементов	143

выпуск **2(36)**
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:	
<i>О. К. Безюков,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. В. Веселков,</i> д.т.н., проф.	
<i>П. А. Гарибин,</i> д.т.н., проф.	
<i>Д. П. Голоскоков,</i> д.т.н., проф.	
<i>Ю. М. Искандеров,</i> д.т.н., проф.	
<i>О. Г. Каратаев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. В. Кириченко,</i> д.т.н., проф.	
<i>М. А. Колосов,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. А. Королева,</i> д.э.н., проф.	
<i>И. И. Костылев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. Л. Кузнецов,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. А. Лаврентьева,</i> д.э.н., проф.	
<i>А. Ю. Ластовцев,</i> к.т.н., проф.	
<i>В. А. Логиновский,</i> д.т.н., проф.	
<i>Г. В. Макаров,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. Е. Марлей,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. М. Никитин,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. П. Нырков,</i> д.т.н., проф.	
<i>Л. И. Погодаев,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. И. Решняк,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. В. Романовский,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. А. Сикарев,</i> д.т.н., проф.	
<i>С. В. Смоленцев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. Л. Степанов,</i> д.т.н., проф.	
<i>М. В. Сухотерин,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. Г. Трунин,</i> к.э.н., директор РРР	
<i>В. И. Черненко,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. Б. Чистов,</i> д.т.н., проф.	

<i>Толокнова О. М., Шошмин В. А. Метод анализа электропотребления перегрузочных процессов в порту</i>	157
<i>Устинов Ю. М., Припотнюк А. В., Кулинич А. И. Анализ современного состояния судовых средств связи и спасания</i>	166
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ	175
<i>Сахаров В. В., Чертков А. А., Сабуров С. В. Моделирование расходов воды речных потоков водных коммуникаций на основе принципа наименьшего действия</i>	175
<i>Кирсанов М. Н. Анализ алгоритмов выбора оптимальных маршрутов группы судов</i>	183
<i>Кукушкин И. В., Нырков А. П., Нырков А. А. Алгоритмическое и программное обеспечение имитационного моделирования процессов переработки каботажных грузов</i>	190
<i>Вардомская А. А. Гибридная нейронная модель двухзвенного манипулятора как звена портового перегрузочного оборудования</i>	200
<i>Кузьменко А. В. Подход к управлению борьбой за живучесть корабля при комплексных авариях на основе методов ситуационного анализа и имитационного моделирования</i>	207
<i>Егоров А. Н., Кузнецов В. А. Распараллеливание вычислений для оптимизации оперативного управления транспортным конвейером шлюзованной системы</i>	214

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	7
<i>Smolentsev S. V.</i> Automatic synthesis of decisions on vessels collision avoidance at sea	7
<i>Dorozhko V. M.</i> Estimation of parametric range of capsizing of seagoing vessel contour in “rogue wave”	16
<i>Galin A. V.</i> Development of a port specialization model based on the priority of cargo flows	27
<i>Reshnyak V. I., Batjaev A. V., Reshnyak K. V.</i> Development of a system of management of ecological safety during shipping	34
<i>Zub I. V., Ezhov Y. E.</i> Modeling of functioning of the transport terminal nested Petri nets	41
<i>Koubassov R. V., Lupachev V. V., Popov M. V.</i> Life activity conditions of staff in side sea craft (review)	49
<i>Rusinov I. A., Gavrilova I. A., Nelogov A. G.</i> The activities of liner conferences in advance of the Code of conduct for Liner Conferences	56
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	67
<i>Thomson P. V.</i> Development of algorithm for computing geodatic latitude in function of spatial coordinates geocentric width	67
<i>Cheban A. Yu.</i> Hydromechanized mining construction of rocks in the basin of river Amur	73
<i>Elagin A. A., Demidov A. L.</i> Analis of sea level determination methods used hydrographic surveys	78
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	90
<i>Bezyukov O. K., Makariev E. V., Mahfoud Mohammad Maad.</i> Research heat balance marine high-speed diesel engines, cooled water and antifreeze	90
<i>Kirillov N. G.</i> The first experience of the Russian ship-using liquefied natural gas as motor fuel	98
<i>Zhukov V. A., Yamanin A. I.</i> The analysis of algorithms for calculation of kinematics of crankshaft-rod mechanism with the coupled connecting-rods	109
<i>Andrianov E. N., Ivanov A. N.</i> General design issues of competitive schemes of distribution mechanisms of the crane and ship drives	118
<i>Koptev A. V.</i> Theoretical research of the flow around cylinder of an ideal incompressible medium in the presence of a shielding effect	127
<i>Gluhih V. N., Petrov V. M., Sojtu N. Ju.</i> Determination of elasticity constants with anisotropy of properties of composite materials used for winding the responsible shell and beam structures in shipbuilding and port infrastructure	137
ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS	143
<i>Saushev A. V., Shirokov N. V.</i> Diagnosing of the condition of electrotechnical systems in space of parameters of their elements	143
<i>Toloknova O. M., Shoshmin V. A.</i> Analysis method of power consumption transshipment processes in port	157
<i>Ustinov Y. M., Pripotnyuk A. V., Kulinich A. I.</i> Analysis of the current state of ship communications and rescue equipment	166

edition **2(36)**
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.

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 175

Saharov V. V., Chertkov A. A., Saburov S. V. Modeling costs water river flows
of water communications on the basis of the principle of least action 175
Kirsanov M. N. Analysis of algorithms for the selection of optimal routes
the group's vessels 183
Kukushkin I. V., Nyrkov A. P., Nyrkov A. A. Algorithms and software
of simulation modeling of the coasting ships processing 190
Vardomskaya A. A. Two – link manipulator hybrid neural model as a part
of port cargo handling equipment 200
Kuzmenko A. V. The approach to the management of the struggle for the vitality
of the ship for complex emergencies based on the methods of situational analysis
and simulation modeling 207
Yegorov A. N., Kuznetsov V. A. Parallel computing for optimization of operational
management of the transport conveyor of lock system 214

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК 656.61.052

С. В. Смоленцев

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕШЕНИЙ ПО РАСХОЖДЕНИЮ СУДОВ В МОРЕ

В статье рассматривается проблема безопасности мореплавания. Для ее решения разрабатывается автоматизированная система расхождения судов в море. В случае, если текущая навигационная ситуация оценивается как опасная, необходимо принимать решения по расхождению с опасными целями. Разрабатываемая система является интеллектуальным советчиком судоводителя. В ней синтезируются варианты оптимальных и субоптимальных решений, обеспечивающие безопасное расхождение со всеми судами-целями в заданной акватории с учетом навигационных ограничений. В статье предложен оригинальный алгоритм синтеза безопасных решений по управлению судном. Получаемое множество решений является результирующим в последовательности множеств: возможные решения — реализуемые решения — допустимые решения — безопасные решения. В качестве вариантов решений судоводителю предлагаются безопасные траектории движения судна, в конечном итоге, приводящие судно на прежний маршрут следования. При этом новые траектории формируются в результате последовательности маневров, соответствующих МППСС-72 в данных условиях плавания.

Ключевые слова: система расхождения судов, предупреждение столкновений, принятие решений, безопасные решения, траектория движения судна, МППСС-72.

Введение

Одним из основных аспектов безопасности мореплавания является обеспечение безопасности расхождения судов в море. Для решения проблемы предупреждения столкновений в 1972 г. была принята Конвенция о Международных правилах предупреждения столкновений судов в море, приложением к которой являются Правила МППСС-72 [1], выполнение которых является обязательным для гражданских судов. Однако применение этих правил не гарантирует безопасности мореплавания, поскольку МППСС не учитывают навигационных ограничений в районе плавания, регламентируют расхождение двух судов, но неприменимы в случае встречи нескольких судов.

Таким образом, использование только МППСС не позволяет обеспечить безопасность мореплавания в узкостях, где в настоящее время скапливаются большие судовые потоки. В условиях большого количества окружающих судов-целей судоводитель физически не может самостоятельно оценить навигационную обстановку и принять правильное решение по управлению своим судном. Решением данной проблемы является создание автоматизированной системы предупреждения столкновений судов. Рассмотрение различных аспектов подобных систем содержится в литературе [2] – [8]. В работе [2] изложены основные принципы построения интеллектуальных систем управления. В работах [3], [4] рассматриваются вопросы использования интеллектуальных систем при решении задач судовождения, в частности задач расхождения судов. Статья [5] содержит интересные идеи по формализации МППСС-72 в системах автоматического расхождения судов в море. В работах группы исследователей ЦНИИ «Электроприбор» [6] – [8] предложен траекторный подход к решению задачи безопасного расхождения судов, учитывающий требования МППСС-72. Аналогичный подход используется и в настоящей статье. В работе [9] была изложена общая структура автоматизированной системы расхождения судов и основные принципы ее функционирования. В публикации [10] описывается подсистема оценки навигационной ситуации, от работы которой зависит необходимость принятия решений по управлению судном для расхождения с другими судами, и рассматриваются основные принципы работы подсистемы принятия

решений по управлению судном в случае возникновения опасной ситуации сближения с окружающими судами-целями или навигационными препятствиями.

Как показано в работе [9], в системе формируется последовательность векторов навигационной ситуации:

$$\mathbf{S} = \{\mathbf{S}_t\}_{t \in [-T, 0]}, \quad (1)$$

где T — глубина хранения истории навигационных ситуаций; \mathbf{S}_t — вектор навигационной ситуации.

Вектор навигационной ситуации представлен в виде

$$\mathbf{S}_t = \langle \mathbf{S}_t^c, \mathbf{S}_t^f, \mathbf{S}_t^e, \mathbf{S}_t^d \rangle, \quad (2)$$

где \mathbf{S}_t^c — текущая навигационная ситуация; \mathbf{S}_t^f — прогноз навигационной ситуации; \mathbf{S}_t^e — оценка навигационной ситуации; \mathbf{S}_t^d — решение по управлению судном в данной навигационной ситуации.

Далее будут рассматриваться принципы формирования компонента \mathbf{S}_t^d — решения по управлению судном. Решение по управлению судном представляет собой множество возможных решений, каждое из которых соответствует некоторому i варианту управления из множества I возможных управлений:

$$\mathbf{S}_t^d = \{\mathbf{S}_t^{di}\}_{i \in I};$$

$$\mathbf{S}_t^{di} = \langle \mathbf{S}_t^{dci}, \mathbf{S}_t^{dfi}, \mathbf{S}_t^{dei}, p_t^i \rangle, \quad (3)$$

где \mathbf{S}_t^{dci} — навигационная ситуация с учетом i варианта управления; \mathbf{S}_t^{dfi} — прогноз навигационной ситуации с учетом i варианта управления; \mathbf{S}_t^{dei} — оценка навигационной ситуации с учетом i варианта управления; p_t^i — вес i варианта управления.

Общие принципы принятия решения

В случае, если оценка текущей навигационной ситуации определена как опасная, необходимо предпринять действия по безопасному расхождению с судами-целями. Для принятия решения по безопасному расхождению необходимо определить новую траекторию движения судна, обеспечивающую безопасное движение судна относительно судов-целей и навигационных опасностей в районе плавания. Однако в системе управления судном необходимо использовать не траекторию движения, а последовательность маневров, приводящую к данной траектории. Таким образом, в качестве решения необходимо получить маневр (последовательность маневров), приводящий к необходимой траектории движения собственного судна.

В дальнейшем термины «маневр» и «последовательность маневров» будут считаться равнозначными в контексте получения одной траектории движения. Маневр должен удовлетворять следующим условиям:

- быть реализуемым судовыми средствами управления;
- быть естественным для судоводителя, т. е. состоять из комбинации стандартных управляющих действий (изменения курса или скорости);
- не противоречить МППСС-72;
- приводить к безопасному расхождению со всеми судами-целями и навигационными опасностями в районе плавания.

Поиск маневра, приводящего к безопасному расхождению, реализуется с помощью механизма порождения и проверки гипотез. Оценка каждой гипотезы (предлагаемого маневра) производится в следующем порядке:

- строится модифицированный маршрут, соответствующий предполагаемому маневру;
- с использованием моделей собственного судна и судов-целей генерируется прогноз траекторий их движения на определенный промежуток времени, таким образом, получают прогноз навигационной ситуации, которая реализуется в случае выполнения данного маневра;

– с использованием методов, изложенных в статье [10], выполняется оценка полученного прогноза навигационной ситуации;

– в случае, если нарушаются навигационные ограничения: прогнозируемая траектория движения собственного судна выходит в зону навигационных опасностей или зоны, запретные для плавания, гипотеза отвергается;

– если траектория движения судна с учетом навигационных ограничений является допустимой, то оценивается риск опасного сближения со всеми контролируруемыми судами-целями. В модуле оценок строится оценка опасности сближения с каждым из судов-целей, а также комплексная оценка по шкале RGB, состоящей из трех категорий: <RED><YELLOW><GREEN> (<опасно><внимание><безопасно>);

– в случае, если комплексная оценка безопасности относится к категории <RED> (<опасно>), гипотеза отвергается, в противном случае данный вариант маневра сохраняется в множестве гипотез-кандидатов.

После проверки всех сгенерированных гипотез, в случае, если множество гипотез-кандидатов не пусто, из них выбирается оптимальное решение.

В качестве решения рассматривается маршрут судна, порождаемый маневром (последовательностью маневров). Каждый маршрут L_i порождает траекторию движения судна в соответствии с его динамикой. При прогнозировании траекторию движения судна (прогноз) строят с использованием следующей модели динамики судна:

$$Tr_0^{di} = F(L^i, M), \quad (4)$$

где Tr_0^{di} — прогноз траектории собственного судна; L_i — маршрут судна (i решение: $i \in I$); M — модель динамики собственного судна.

В случае, если текущий маршрут L^0 порождает опасную прогнозируемую траекторию собственного судна, необходимо найти новый маршрут, который обеспечит безопасность получаемой траектории движения судна.

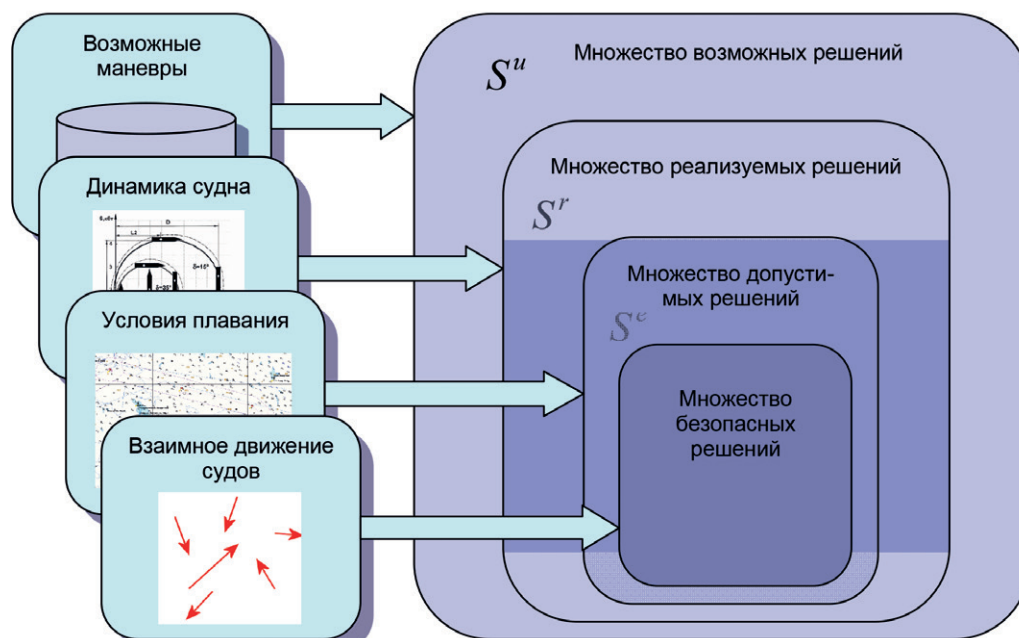


Рис. 1. Соотношения множеств решений

На рис. 1 показаны следующие множества решений:

S^u — **множество возможных решений**, которое определяется множеством возможных маневров и содержит все возможные маршруты из заданной начальной точки в заданную конечную точку;

S^r — **множество реализуемых решений**, которое определяется динамикой судна и содержит маршруты, по которым может следовать судно с учетом его динамических характеристик;

S^e — **множество допустимых решений**, которое определяется условиями плавания и содержит реализуемые маршруты, которые являются безопасными и разрешенными в заданной акватории с учетом навигационных ограничений, районов ограниченного плавания и т. п.;

S^s — **множество безопасных решений**, которое определяется параметрами сближения с судами-целями и содержит маршруты, безопасные как с точки зрения навигационных ограничений, так и безопасного расхождения со всеми целями в районе плавания.

Соотношение этих множеств можно выразить следующим образом:

$$S^s \subset S^e \subset S^r \subset S^u. \quad (5)$$

Таким образом, задачей модуля принятия решений является построение множества безопасных решений. В случае, если это множество окажется не пустым ($S^s \neq \emptyset$), необходимо найти оптимальное решение:

$$S^* \in S^s, \\ Crit(S^*) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Параметризация решений

Для построения множества возможных решений необходимо определить те маршруты, которые будут считаться возможными. Обозначим первоначальный маршрут (заданный план движения собственного судна — *Voyage Plan*) — L^0 , маршрут определяющий i возможное решение — L^i , разность маршрутов $DL = |L^0 - L^i|$. Тогда маршрут $L^i \in S^u$, т. е. является возможным, если он удовлетворяет следующим условиям.

1. Маршрут L^i (возможное решение) отличается от первоначального маршрута L^0 на ограниченном участке (DL ограничено).
2. Разность маршрутов DL может порождаться не более чем тремя маневрами изменения курса.
3. Разность маршрутов DL может порождаться не более чем двумя маневрами изменения скорости.

Таким образом, рассматриваются маневры либо курсом (не более трех поворотов, последний из которых должен привести на первоначальный маршрут), либо скоростью (не больше двух изменений скорости, последнее из которых должно восстановить плановую скорость на соответствующем участке первоначального маршрута).

Представим первоначальный маршрут в виде объединения двух сегментов:

$$L^0 = L^0_S \cup L^0_F. \quad (7)$$

Аналогично представим возможный маршрут:

$$L^i = L^i_S \cup L^i_F. \quad (8)$$

Разбиение на сегменты выполним таким образом, чтобы эти маршруты различались только начальными сегментами:

$$L^0_F = L^i_F; \\ DL = |L^0_S - L^i_S|. \quad (9)$$

Тогда при анализе различных маршрутов можно рассматривать только их начальные сегменты. Соответственно можно ввести следующую параметризацию начальных сегментов маршрутов, а значит и возможных решений:

$$L^k_S = \langle L^k_0, L^k_1, \alpha^k_0, \alpha^k_1 \rangle \text{ — для маневров курсом;}$$

$L_S^V = \langle L_0^V, L_1^V, V_0^V \rangle$ — для маневра скоростью;

L_0^k — расстояние от текущей точки местоположения судна до точки первого поворота;

L_1^k — расстояние от точки первого поворота до точки второго поворота (расстояние движения на новом курсе);

α_0^k — изменение курса при первом повороте;

α_1^k — изменение курса при втором повороте;

L_0^V — расстояние от текущей точки местоположения судна до точки начала маневра скоростью;

L_1^V — расстояние движения с новой скоростью;

V_0^V — значение новой скорости.

На рис. 2 приведены параметры маршрута для маневра курсом, а на рис. 3 — параметры маршрута для маневра скоростью.

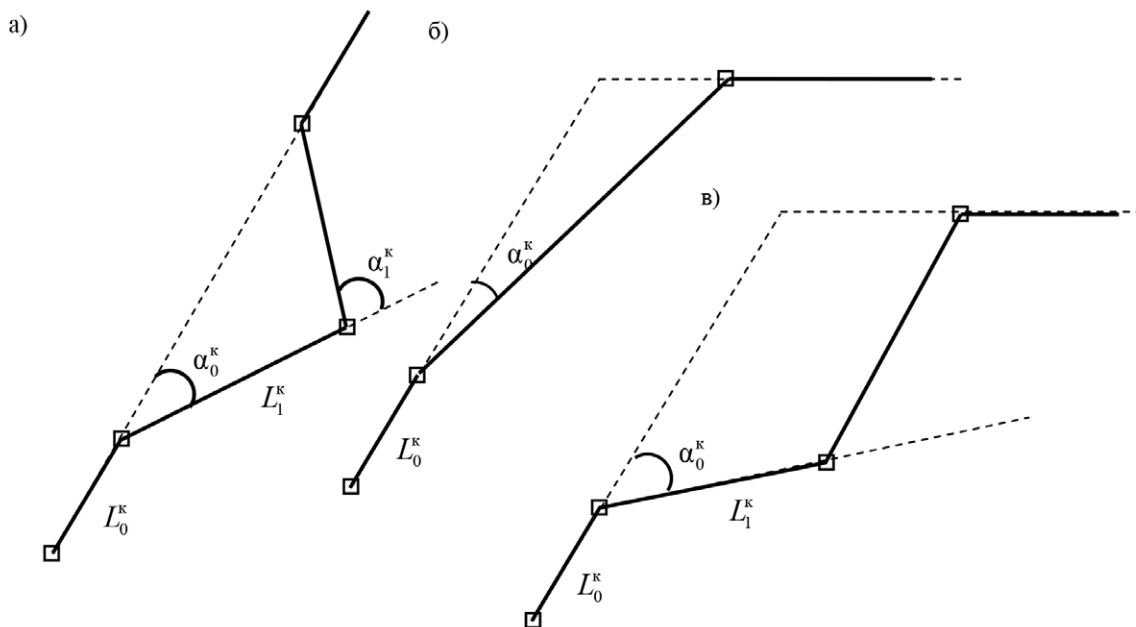


Рис. 2. Параметры маршрута для маневра курсом:
 а — $L_S^k = \langle L_0^k, L_1^k, \alpha_0^k, \alpha_1^k \rangle$; б — $L_S^k = \langle L_0^k, 0, \alpha_0^k, 0 \rangle$; в — $L_S^k = \langle L_0^k, L_1^k, \alpha_0^k, 0 \rangle$

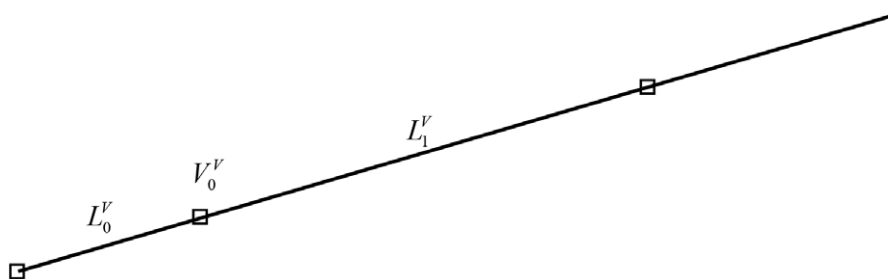


Рис. 3. Обозначение параметров маршрута для маневра скоростью

Генерация решений

В модуле генерации решений заполняется компонента S_i^d -решения по управлению судном. Для этого генерируется множество возможных вариантов управления судном. Для генерации

различных решений используются знания из базы, содержащей сведения, полученные по различным вариантам маневрирования судном:

$$\mathbf{S}_t^d = \{\mathbf{S}_t^{di}\}_{i \in I};$$

$$\mathbf{S}_t^{di} = \langle \mathbf{S}_t^{dci}, \mathbf{S}_t^{dfi}, \mathbf{S}_t^{dei}, p_t^i \rangle. \quad (10)$$

В этом модуле для каждого i -го варианта решения из множества возможных решений I заполняется компонента \mathbf{S}_t^{dci} — навигационная ситуация с учетом управления, принятого в данном варианте решения:

$$\mathbf{S}_t^{dci} = D(\mathbf{S}_t^c, \mathbf{S}_t^f, U_t^i, M_0, K_d), \quad (11)$$

где U_t^i — принятый вариант управления для i -го варианта, который представляет собой маршрут L_t^i : $U_t^i = L_t^i$; M_0 — модель собственного судна; K_d — знания по управлению судном.

Для каждого построенного решения в модуле прогноза формируется прогноз развития ситуации \mathbf{S}_t^{dfi} , в котором учитывается прогноз траектории своего судна в соответствии с выбранным маршрутом $Tr_{0i} = F(L_t^i, M)$. Траектории судов-целей при этом остаются такими же, как и в прогнозе \mathbf{S}_t^f :

$$\mathbf{S}_t^{dfi} = \langle Tr_0^{di}, \{Tr_j\}_{j \in J} \rangle. \quad (12)$$

Затем в модуле оценок проводят оценку безопасности навигационной ситуации с учетом новой траектории движения Tr_0^{di} и заполняют компоненту \mathbf{S}_t^{dei} . Подробно методика оценки безопасности навигационной ситуации изложена в статье [10]. В соответствии с данной методикой строятся следующие оценки:

$$e(Tr_0^{di}) = \min(Q_l), l \in L;$$

$$e(Tr_0^{di} \circ Tr_j) = Q_j, j \in J, \quad (13)$$

где Q_l — оценка безопасности i -го решения по шкале RYG;

$e(Tr_0^{di})$ — оценка безопасности траектории относительно навигационных опасностей по шкале RYG в случае, если $e(Tr_0^{di}) = R$, т. е. она является опасной, это решение отбрасывается.

Таким образом, множество допустимых решений S^e содержит только те из них, для которых $e(Tr_0^{di}) > R$. Для оставшихся решений проводят оценку безопасности их траекторий относительно траекторий судов-целей.

Множество безопасных решений S^s включает все решения, траектории которых удовлетворяют следующему условию:

$$\min(e(Tr_0^{di} \circ Tr_j)) = \min Q_j > R, j \in J. \quad (14)$$

Соответственно множество безопасных решений содержит только безопасные (относительно навигационных опасностей и судов-целей) траектории.

Учет требований МППСС-72

При генерации решений необходимо учитывать требования МППСС-72 [1], т. е. маневры, которые предпринимаются для расхождения с судами-целями, должны соответствовать требованиям ч. В МППСС-72 [1]. Например, *Правило 8* «Действия для предупреждения столкновения» определяет предпочтительность маневра курсом над маневром скоростью в случае, если имеется достаточное водное пространство. Кроме того, требуется заметность предпринимаемого маневра и неприемлемость использования ряда последовательных небольших изменений курса и (или) скорости. Это накладывает определенные ограничения на возможные маневры при генерации решений. *Правило 19* «Плавание судов при ограниченной видимости» требует при выполнении маневров на расхождение избегать:

- изменения курса влево, если другое судно находится впереди траверза и не является обгоняемым;
 - изменения курса в сторону судна, находящегося на траверзе или позади траверза.
- Таким образом, подобные маневры следует исключать из рассмотрения в случае, если судно находится в условиях ограниченной видимости.

Выбор оптимального решения

Выбор оптимального решения осуществляется из множества безопасных решений. В данном множестве могут находиться решения, порожденные управлениями как курсом, так и скоростью:

$$S^s = J_K \cup J_V. \quad (15)$$

При выборе оптимального маневра курсом используются следующие критерии оптимальности:

- минимум расстояния, пройденного на модифицированном участке маршрута:

$$R_1^K = \min_{j \in J_K} \left(\sum_{i=1..N_j} d_{ij} \right), \quad (16)$$

где $d_j = \sum_{i=1..N_j} d_{ij}$ — сумма длин участков движения судна на модифицированном участке маршрута L_S^K .

- минимум суммы углов поворота при маневрировании курсом:

$$R_2^K = \min_{j \in J_K} \left(\sum_{i=1..N_j} \Delta K_{ij} \right), \quad (17)$$

где $\Delta K_\Sigma = \sum_{i=1..N_j} \Delta K_{ij}$ — сумма углов поворотов при маневрировании курсом, включая поворот на прежний (заданный исходным маршрутом) курс.

Поскольку имеется два критерия оптимальности, то применяются они по следующей схеме.

1. На множестве безопасных решений по управлению курсом с помощью первого критерия оптимальности получают множество субоптимальных решений:

$$J_K^* = \{j | R_1^K(j) < \rho, j \in J_K\}, \quad (18)$$

где ρ — заданный уровень.

Таким образом,

$$J_K^* \subset J_K. \quad (19)$$

2. На множестве субоптимальных решений с помощью второго критерия находят оптимальное решение:

$$j^* = j : \min(R_2^K(j)), j \in J_K^*. \quad (20)$$

При выборе оптимального маневра скоростью используют критерий минимума времени при движении судна с модифицированной скоростью:

$$R^V = \min_{j \in J_V} \left| \frac{D_j}{V_j} - \frac{D_j}{V} \right|, \quad (21)$$

где V — первоначальная скорость собственного судна; V_j — скорость движения при маневре скоростью; D_j — расстояние движения с новой скоростью.

Таким образом, если это возможно, находятся два оптимальных решения: *маневрирование курсом* и *маневрирование скоростью*. Эти решения выводятся как рекомендации для судоводителя. Кроме того, имеется возможность отображения множества субоптимальных решений, определяемых параметром ρ , значение которого может задаваться судоводителем (рис. 4).

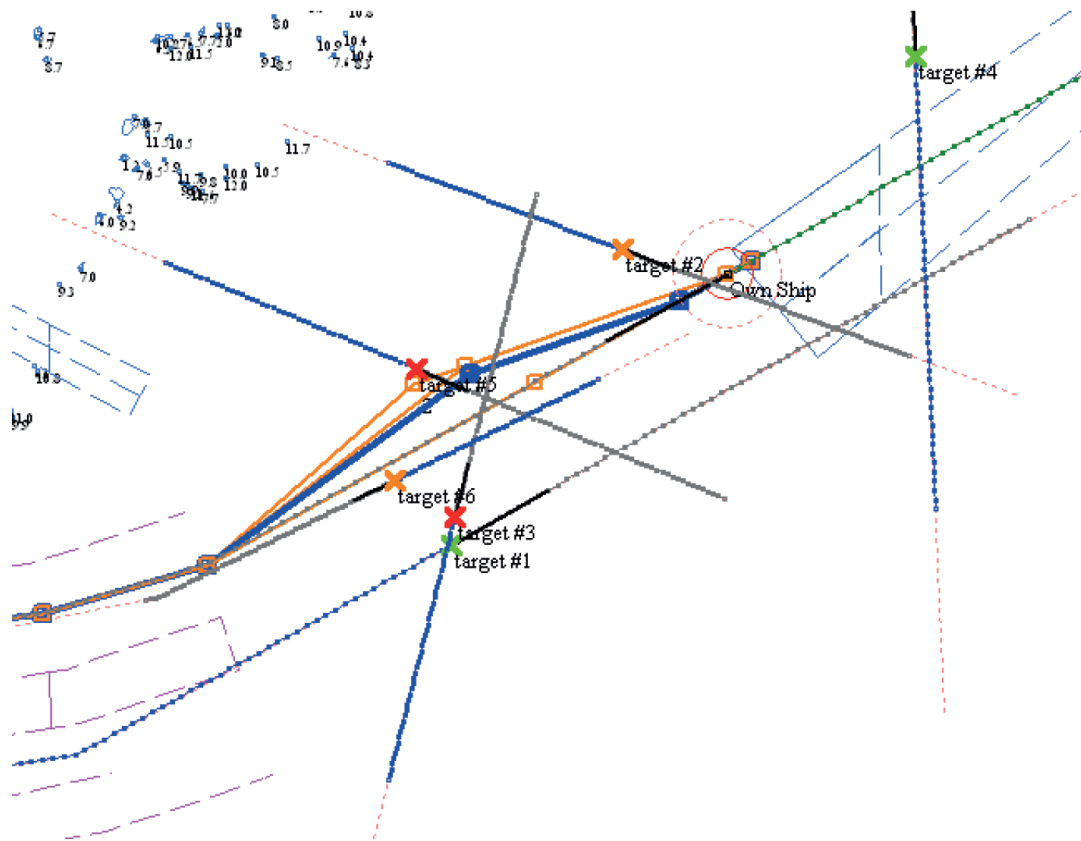


Рис. 4. Оптимальное и субоптимальные решения

Выводы

1. В данной работе изложена методика автоматического принятия решений в автоматизированной системе расхождения судов в море. Решения, принимаемые в системе, позволяют безопасно разойтись одновременно с несколькими судами с учетом навигационных ограничений района плавания. Кроме того, эти решения строятся в соответствии с требованиями МППСС-72 и являются естественными для судоводителя.

2. Рекомендации по безопасному расхождению предоставляются судоводителю в виде набора оптимальных и субоптимальных маршрутов, из которых он может выбрать маршрут, соответствующий его собственным предпочтениям.

3. Система расхождения судов в море, основные принципы работы которой изложены в настоящей статье и в статье [10], реализована в виде программно-аппаратного комплекса, который прошел испытания на судне компании Совкомфлот в 2015 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). — 5-е изд. — М.: Моркнига, 2011. — 142 с.
2. Васильев С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев, А. К. Жерлов, Е. А. Федосов [и др.]. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.
3. Вагущенко Л. Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
4. Вагущенко Л. Л. Мультиагентный подход к решению задач расхождения судов / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко // Судовождение. — 2008. — № 15. — С. 35–43.
5. Цымбал Н. Н. Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении / Н. Н. Цымбал, Р. Ю. Бужбецкий // Судовождение. — 2006. — № 12. — С. 124–129.

6. *Dmitriev S. P. Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework / S. P. Dmitriev, N. V. Kolesov, A. V. Osipov // 5th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft, Aalborg, Denmark, 2000. — Oxford: Pergamon, 2001. — Pp. 373–378.*

7. *Дмитриев С. П. Автоматический синтез траекторий движения как средство интеллектуальной поддержки судоводителя / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов, Г. Н. Романычева // Гироскопия и навигация. — 2001. — № 3 (34). — С. 19–31.*

8. *Дмитриев С. П. Система интеллектуальной поддержки судоводителя при расхождении судов / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов, Г. Н. Романычева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2003. — № 2. — С. 98–105.*

9. *Смоленцев С. В. Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев, Б. В. Афанасьев, А. Е. Филяков, Д. В. Куниц // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.*

10. *Смоленцев С. В. Проблема оценки навигационной ситуации в море / С. В. Смоленцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 23–28.*

AUTOMATIC SYNTHESIS OF DECISIONS ON VESSELS COLLISION AVOIDANCE AT SEA

The current article discusses the problem of maritime safety. To solve this problem an automated vessels collision avoidance system was developed. If the current navigation situation is estimated as dangerous, there is a need to make decisions to maneuver. The developed system is an intelligent advisor. This system offers options for optimal and suboptimal solutions for collision avoidance with all targets-vessels considering the navigational restrictions in the area. The authors propose an original algorithm of the synthesis of safe ship management solutions. The final set of solutions is a result of a sequence of sets: Possible solutions — Workable solutions — Feasible solutions — Safe solutions. Safe paths for the vessel are presented as possible solutions, eventually leading the vessel to its initial route. New trajectories are formed by a sequence of maneuvers as consistent with COLREG-72 in current navigation conditions.

Keywords: collision avoidance system, collision avoidance, making decisions, safe solutions, ships trajectory, COLREG-72.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnye pravila preduprezhdenija stolknovenij sudov v more 1972 g. (MPPSS-72). 5-e izd. M.: Morkniga, 2011.*

2. *Vasilev, S. N., A. K. Zherlov, E. A. Fedosov, et al. Intellektualnoe upravlenie dinamiceskimi sistemami. M.: Fizmatlit. 2000.*

3. *Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. Podderzhka reshenij po rashozhdeniju s sudami. Odessa: Feniks, 2010.*

4. *Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. “Multiagentnyj podhod k resheniju zadach rashozhdenija sudov.” *Sudovozhdenie* 15 (2008): 35–43.*

5. *Cymbal, N. N., and R. Ju. Buzhbeckij. “Formalizacija MPPSS-72 v chasti koordinacii vzaimodejstvija sudov pri rashozhdenii.” *Sudovozhdenie* 12 (2006): 124–129.*

6. *Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, and A. V. Osipov. “Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework.” *5th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft, Aalborg, Denmark, 2000.* Oxford: Pergamon, 2001: 373–378.*

7. *Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, A. V. Osipov, and G. N. Romanycheva. “Avtomaticeskij sintez traektorij dvizhenija kak sredstvo intellektual’noj podderzhki sudovoditelja.” *Gyroskopy and Navigation* 3(34) (2001): 19–31.*

8. *Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, A. V. Osipov, and G. N. Romanycheva. “System of intelligent support of a ship navigator for collision avoidance.” *Journal of Computer and Systems Sciences International* 42.2 (2003): 256–263.*

9. *Smolentsev, S. V., B. V. Afanasiev, A. E. Filyakov, and D. V. Kunits. “Concept of automated intelligent system for ships collision avoidance.” *Jekspluatacija morskogo transporta* 4(70) (2012): 11–14.*

10. *Smolentsev, S. V. “The problem of estimation of navigation situation in the sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 23–28.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Smolentsev Sergey Victorovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2016 г.

УДК 004: 656.61.073

В. М. Дорожко

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ОПРОКИДЫВАНИЯ КОНТУРА
МОРСКОГО СУДНА НА «ВОЛНЕ-УБИЙЦЕ»**

На основе метода вычислительной гидродинамики создан виртуальный опытовый бассейн, в котором выполнялись вычисления опрокидывания контура морского судна. Обоснован выбор типа и параметров «волны-убийцы» с одним центральным максимумом высотой 30 м и двумя боковыми возвышениями. Сформулированы начальные и граничные условия, обеспечивающие генерацию «волны-убийцы» в расчетной области и движение контура под воздействием волн. Обеспечена регистрация на каждом шаге вычислений величин, определяющих движение контура. Выбран перечень основных параметров, оказывающих влияние на устойчивость контура к опрокидыванию «волной-убийцей», к которым относятся масса контура, начальная метацентрическая высота контура, длина «волны-убийцы», начальное удаление контура от «волны-убийцы». Для всех сочетаний указанных параметров получены значения максимального угла крена контура. На основании указанных параметров сформированы параметрические области, соответствующие «опрокидыванию» контура. Установлено, что уменьшение массы контура судна, его начальной метацентрической высоты, начального расстояния контура до «волны-убийцы» и её длины способствует «опрокидыванию» контура. Полученные результаты могут использоваться при разработке мероприятий по обеспечению безопасности и проектированию морских судов.

Ключевые слова: «волна-убийца», вычислительная гидродинамика, контур судна, опрокидывание судна, метацентрическая высота контура, угол крена.

Введение

Среди многообразия морских волн особое место занимают «волны-убийцы», достигающие высоты 30 м [1]. Исследования механизма их возникновения выполнены Т. В. Benjamin, J. E. Feir и В. Е. Захаровым в периодическом издании [2]. В России изучением «волн-убийц» занимаются ученые Е. Ф. Пелиновский, С. И. Бадулин, А. И. Дьяченко, И. И. Диденкулова, В. Е. Захаров, А. А. Куркин, А. В. Слюняев, Д. В. Чаликов, Р. В. Шамин и др. Исследование этих волн является актуальным научным направлением. Такие проекты, как «MaxWave» (2000 – 2003 гг.) [3] и «Extreme Seas» (2009 – 2012 гг.), см. сайт в Интернете <https://www.hse.ru/data/2011/10/12/1270460467/ES%202011sep17.pdf>, были профинансированы Евросоюзом с целью установки частоты возникновения «волн-убийц» и разработки предложений по безопасности морских судов. Для координации отечественных исследований в 2012 г. был создан Научный центр по изучению «волн-убийц». За рубежом аналогичными исследованиями занимается «Rogue Waves Research Project»), сокр. назв. «MULTIWAVE» (сайт в Интернете <http://www.ercmultiwave.eu>), в состав которого от России входит академик В. Е. Захаров.

В ряде публикаций: [1], [4], приводится анализ потерь среди морских судов от встречи с «волнами-убийцами». Считается, что именно эти волны явились причиной гибели 22 супертанкеров [1] в период 1968 – 1994 гг. Только за четыре года (2006 – 2010 гг.) было зарегистрирова-

но 78 случаев возникновения «волн-убийц», в которых погибли или получили повреждение морские суда или люди [4]. Всё это служит основанием для проведения прикладных исследований, связанных с «волнами-убийцами». Однако работ, непосредственно связанных с опрокидыванием морских судов на этих волнах, крайне мало. В качестве примера можно привести исследование в опытовом бассейне в масштабе 1 : 142 воздействия «волны-убийцы» на модель судна [5], так как создать в бассейне «волну-убийцу» высотой 30 м практически нереально. Другим примером является аналитическая работа, [6] в которой исследование устойчивости судна к опрокидывающему действию волн ограничивается креном (до 45°), при котором всё еще оправдано разложение в ряды моментов сил демпфирования, накренения и восстановления.

Следует отметить, что в процессе встречи морского судна с «волной-убийцей» имеет место формирование взаимосвязанных сильных нелинейных процессов — нарастание крена судна до угла опрокидывания ($> 80^\circ$) и рост крутизны «волны-убийцы» до значений, превышающих пороговое значение 0,443, отделяющее линейные процессы преобразования волн от нелинейных. При этом опрокидывающееся судно оказывает влияние на поля скорости и давления в «волне-убийце», которые, в свою очередь, оказывают влияние на изменение угла крена судна. Следовательно, для корректного исследования опрокидывания морского судна необходимо рассматривать морское судно и «волну-убийцу» как единую взаимосвязанную систему «морское судно — «волна-убийца»», на поведение которой оказывают влияние такие основные параметры, как крутизна «волны-убийцы», длина её центральной волны, начальное удаление морского судна от «волны-убийцы» в момент её возникновения, водоизмещение морского судна и его начальная поперечная метацентрическая высота. В связи с этим ставится задача выполнения оценки параметрической области опрокидывания контуров (миделевое сечение судна) морских судов водоизмещением 1000 – 10000 т на «волнах-убийцах» различной длины высотой 30 м в зависимости от основных параметров системы «контур морского судна — «волна-убийца»»:

- масса контура;
- начальная метацентрическая высота контура;
- длина центральной волны «волны-убийцы»;
- начальное удаление контура от «волны-убийцы».

Общие модельные представления системы «контур морского судна — «волна-убийца»»

Процесс формирования «волны-убийцы» с момента зарождения и до обрушения можно условно разбить на четыре этапа. На первом этапе в результате пространственно-временной фокусировки формируется узкий спектр почти монохроматической волны. На втором этапе в результате модуляционной неустойчивости возникает солитон, под огибающей которого находятся 3 – 20 периодов волны. Если крутизна волны ($S = \pi H/\lambda$, где H и λ — высота и длина волны соответственно) превышает пороговое значение 0,443, то на третьем этапе за счет нелинейных процессов происходит увеличение крутизны и рост высоты волны до высот 30 м, характерных для «волны-убийцы». На четвертом этапе крутизна «волны-убийцы» увеличивается до максимальных значений, когда фронт «волны-убийцы» становится вертикальным, после чего происходит её обрушение. В соответствии с поставленной задачей достаточно выполнить численное моделирование опрокидывания контура морского судна (далее — контура) под воздействием «волны-убийцы» на третьем и четвертом этапах.

В последние десятилетия в связи с развитием информационных технологий всё чаще находит применение метод вычислительной гидродинамики (CFD — *computational fluid dynamics*) [7], который позволяет численными методами имитировать опытовый бассейн, в связи с этим представляя собой достойную альтернативу дорогостоящим экспериментальным исследованиям. CFD-метод использует уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (RANS-уравнения — *Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*), которые записываются в виде:

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

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

где $\{i, j\} = 1, 2, 3$; x_1, x_2, x_3 — декартовы координаты в абсолютной системе $ox_1x_2x_3$ и соответствующие им u_1, u_2, u_3 — осредненные значения поля скорости жидкости; u'_1, u'_2, u'_3 — флуктуации скорости; t — время; ρ, μ и g — плотность, вязкость жидкости и ускорение свободного падения, соответственно; p — давление, δ_{ij} — символ Кронекера.

Последний член в уравнении (2) — напряжение Рейнольдса, которое вычислено в соответствии с моделью турбулентности $k_t - \epsilon, RNG$ [8], обеспечивающей получение расчетных величин, близких к экспериментальным значениям.

Отметим основные положения методики численного решения [7] уравнений (1), (2). Геометрическое пространство (расчетная область), в котором выполнялись вычисления, разбивалась сеточными элементами, что позволило сформировать с помощью *метода конечного объема* разностный аналог RANS-уравнений. Полученная система алгебраических уравнений решалась *методом Гаусса – Зейделя*. Связь между полями скорости и давления, обеспечивающая выполнение уравнения неразрывности, реализована при помощи алгоритма PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*). Для аппроксимации градиентов применен *Green-Gauss-Cell-метод*. Пространственная дискретизация поля давления и скорости выполнена с помощью схем второго порядка точности. Дискретизация решения во временной области выполнена переменным шагом, обеспечивающим устойчивость решения при изменении максимальных значений поля скорости.

Вычисление опрокидывания контура на «волне-убийце» выполнено в расчетной области рис. 1, имеющей форму прямоугольника, и в декартовой системе oxy , совпадающей с системой координат ox_1x_2 уравнений (1) и (2).

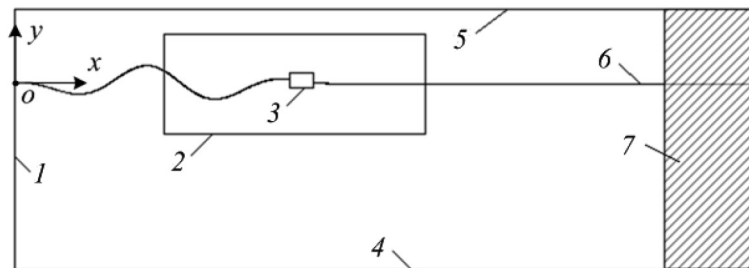


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 — входная граница; 2 — область движения контура; 3 — контур; 4 — нижняя граница расчетной области; 5 — верхняя граница расчетной области; 6 — начальный профиль «волны-убийцы»; 7 — область повышенного затухания волн; oxy — система координат

Согласно натурным наблюдениям, «волна-убийца» в момент возникновения имеет форму высокого центрального максимума с двумя боковыми возвышениями [9], начальный профиль (для $t = 0$) которой можно представить в виде выражения

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

где $a_b, k_b = 2\pi/\lambda_b$ (λ_b — длина волны); a_b, k_b — соответственно начальная амплитуда и волновое число; x_b — абсцисса начального положения центрального максимума волны на оси ox (рис. 1).

В расчетном пространстве, в соответствии с сеточной разбивкой, начальный профиль (см. выражение (3)) «волны-убийцы» можно представить в виде массива дискретных значений

w_i ($i = 0, \dots, N - 1$) от дискретного аргумента $x = x_0, \dots, x_i, \dots, x_{N-1}$, где N и i — число и порядковый номер элементов сеточной разбивки соответственно. Расстояние ($x_{i+1} - x_i$) между двумя смежными значениями аргумента x соответствует проекции шага сеточной разбивки на ось ox . С помощью дискретного преобразования Фурье получен пространственный спектр комплексных амплитуд Y_n от массива w_i дискретных значений начального профиля «волны-убийцы»:

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

где j — комплексная единица.

В центре пространственного спектра (4) располагается спектральная составляющая максимальной высоты с длиной волны, равной λ_b (см. выражение (3)), которую далее будем называть *длиной центральной волны*. Левая часть от центра пространственного спектра (4) содержит длинноволновые спектральные составляющие, правая — коротковолновые составляющие. В случае учета наиболее длинноволновых составляющих (для выполнения условия глубокой воды $h \geq 0,5\lambda_b$, где h — глубина воды) потребуется увеличить глубину воды в расчетной области до нескольких километров. Учет коротковолновых составляющих спектра потребует сеточной разбивки элементами размером менее 0,25 м. Таким образом, численное моделирование пространственного спектра (4) потребует, с одной стороны, увеличения геометрических размеров расчетной области, а с другой — применения мелкой сеточной разбивки, что, в конечном итоге, приведет к необходимости использования значительного вычислительного ресурса. В связи с этим было принято решение выполнить усечение боковых составляющих пространственного спектра (4), величина модуля которых не превышает 5 % от модуля центральной спектральной амплитуды, что позволило сократить требования, предъявляемые к вычислительному ресурсу. При этом профиль «волны-убийцы», полученный с помощью обратного преобразования Фурье усеченного спектра, совпал с профилем выражения (3), что указывает на допустимость подобного усечения.

На основе усеченного пространственного спектра, являющегося массивом комплексных амплитуд (спектральных составляющих) синусоидальных волн, сформирован вектор скорости воды, втекающей в расчетную область, горизонтальная u_x и вертикальная u_y , проекции которого на оси ox и oy (рис. 1), соответственно, вычисляются в соответствии с выражениями:

$$u_x = \sum_{n=l}^L \frac{gk_n |Y_n|}{\sigma_n} \exp(k_n y) \cos(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n); \quad (5)$$

$$u_y = \sum_{n=l}^L \frac{gk_n |Y_n|}{\sigma_n} \exp(k_n y) \sin(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (6)$$

где $|Y_n|$ — модуль комплексной спектральной составляющей n -й синусоидальной волны; g — ускорение свободного падения; $k_n = 2\pi/\lambda_n$ — волновое число; $\sigma_n = \sqrt{gk_n}$ — угловая частота; x_0 — координата входной границы расчетной области; φ_n — значение фазового угла n -й составляющей пространственного спектра, l и L — номера комплексных спектральных составляющих левой и правой границы усеченного спектра соответственно.

Внутри расчетной области выделена область (см. рис. 1, область 2) прямоугольной формы, пространство которой разбито треугольными сеточными элементами, допускающими их перестройку во время движения контура (см. рис. 1, контур 3). Остальное пространство расчетной области разбито квадратными сеточными элементами. Для решения уравнений (1) и (2) требуется задание граничных (на границах расчетной области, контура и поверхности жидкости) и начальных условий — значения полей давления и скорости во всем пространстве расчетной области в начальный ($t = 0$) момент времени.

Граничное условие на входе в расчетную область (см. рис. 1, граница 1) представляет вектор скорости втекающей жидкости, проекции которого на оси системы координат вычисляются в соответствии с выражениями (5) и (6). Граничные условия на дне расчетной области (см. рис. 1, граница 4) соответствуют нулевому значению проекции скорости жидкости на нормаль к границе.

Граничное условие на периметре контура (см. рис. 1, контур 3) представляет собой давление, вычисляемое на каждом временном шаге Δt решения. На основе указанного давления вычисляются векторы силы F_G и момента M_G , приложенные к центру тяжести контура, которые, в свою очередь, используются для вычисления векторов линейного $a_G = F_G / M_C$ и углового $\epsilon_G = M_G / J_z$ ускорений центра тяжести контура, где M_C и J_z — соответственно масса и момент инерции масс контура. В конце каждого временного шага Δt контур смещается и поворачивается на величину вектора $\Delta l = 0,5a_G \Delta t^2$ и угла $\Delta \theta = 0,5\epsilon_G \Delta t^2$ соответственно.

Граничное условие наверху расчетной области (см. рис. 1, граница 5) соответствует атмосферному давлению воздуха. В конце расчетной области создано повышенное затухание (см. рис. 1, область 7), исключающее отражение «волны-убийцы» от правой границы.

Для обеспечения формирования граничных условий на поверхности жидкости (см. рис. 1, граница 6) на каждом шаге Δt вычислялось положение границы раздела воды и воздуха *методом объема жидкости* (VOF – *Volume of fluid method*) [7], согласно которому в пределах каждой сеточной ячейки выполнялась линейная аппроксимация профиля «волны-убийцы» на основе результатов вычисления доли воды / воздуха в каждой сеточной ячейке. Граничные условия на поверхности жидкости представляют собой совокупность вычисленных значений скорости и давления жидкости и воздуха в каждой сеточной ячейке на границе раздела фаз (вода / воздух).

Начальные условия уравнений (1) и (2) в момент $t = 0$ созданы путем инициализации расчетного пространства от входных скоростей (5) и (6), что позволило создать поле скоростей, соответствующее начальному состоянию профиля (см. рис. 1, граница 6) «волны-убийцы» в формуле (3). Вычисленные в конце первого шага значения поля скорости и давления на границах и в расчетной области определяют граничные и начальные условия для второго шага решения, результаты вычисления в конце второго шага — граничные и начальные условия для третьего шага и т. д. — на протяжении всего процесса решения задачи.

Как отмечалось ранее, высота «волны-убийцы» может увеличиться до 30 м за счет нелинейных процессов при условии, что её начальная крутизна превышает 0,443. В связи с этим формирование массива «волн-убийц» было выполнено в два этапа. На первом этапе выбран ряд базовых волн, соответствующих выражению (3), крутизной, превышающей 0,443, длиной центральной волны λ_b , равной 100 м, начальными амплитудами a_b , составляющими 8 – 12 м и начальным положением x_b центрального максимума, равным 100 м. Базовые волны с начальной амплитудой менее 8 м и более 12 м не представляют опасности для судов: первая — в силу своей незначительной крутизны, вторая — по причине непродолжительного существования из-за быстрого смыкания первого и второго максимумов и следующего за этим обрушения. Для каждой базовой волны в расчетной области выполнено CFD-моделирование её развития от начала ($t = 0$) до обрушения. При этом установлено, что высота базовой волны за время её развития дважды достигает максимальных значений.

На втором этапе для каждой базовой волны был вычислен масштабирующий коэффициент в соответствии с выражением $m = H_w / H_{b2}$, где H_w — высота «волны-убийцы», принятая равной 30 м; H_{b2} — высота второго максимума базовой волны. Затем параметры каждой базовой волны (a_b, λ_b, x_b) умножались на соответствующий масштабирующий коэффициент, в результате были получены значения начальной амплитуды a_r , длины λ_r центральной волны и начального положения x_r центрального максимума «волн-убийц», которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры базовых волн и «волн-убийц»

Базовые волны						m	«Волны-убийцы»			
a_b , м	λ_b , м	x_b , м	H_b , м	S_b	H_{b2} , м		a_r , м	λ_r , м	x_r , м	S_m
8	100	100	15,5	0,49	17,2	1,74	13,92	174	174	0,54
9	100	100	17,2	0,54	20,1	1,49	13,41	149	149	0,63

Таблица 1
(Окончание)

10	100	100	18,8	0,59	21,7	1,38	13,80	138	138	0,68
11	100	100	20,5	0,64	23,1	1,30	14,30	130	130	0,73
12	100	100	22,0	0,69	24,9	1,20	14,40	120	120	0,78

Примечания:

$S_b = \pi H_b / \lambda_b$ и H_b — начальные крутизна и высота базовой волны соответственно;

$S_m = 30\pi / \lambda_r$ — максимальная крутизна «волны-убийцы» в момент достижения высоты 30 м.

При этом установлено, что масштабирование обеспечивает геометрическое подобие профилей базовых волн и соответствующих им «волн-убийц». Отсюда следует совпадение начальной крутизны базовых волн с начальной крутизной соответствующих «волн-убийц». Полученные параметры a_r , λ_r , x_r были использованы в выражении (3) вместо a_b , λ_b , x_b , что обеспечило получение соответствующего пространственного спектра комплексных амплитуд (4) и скорости втекающей жидкости в выражениях (5), (6) и, в конечном итоге, формирование в расчетной области «волн-убийц» высотой $30 \pm 0,1$ м.

Выражения (1) и (2), дополненные описаниями методов решения, граничных условий, технологии выбора и формирования массива «волн-убийц», представляют собой модель системы «контур морского судна — «волна-убийца»».

При проведении данного исследования из всего многообразия морских судов выбраны рыбопромысловые суда [10] (табл. 2), которые по роду своей деятельности в течение длительного периода времени пребывают в штормовых условиях, что повышает вероятность их встречи с «волнами-убийцами». Значения начальных метацентрических высот выбраны в соответствии с рекомендациями для рыбопромысловых судов [11].

Таблица 2

Тип, водоизмещение рыбопромысловых судов и параметры их контуров

Тип и водоизмещение судов, т	Параметры контуров					
	Ширина, м	Высота, м	Осадка, м	Масса, кг	Момент инерции, кг·м ²	Значения начальных метацентрических высот, м
СРТМ тип «Иван Шаньков», 1389	11,0	7,3	5,2	56100	670767	0,5; 0,75; 1,0
БМРТ тип «Иван Бочков», 4947	15,9	10,0	5,66	88277	2718078	0,75; 1,0; 1,25
РТМКС тип «Моонзунд», 9260	19,0	12,2	6,60	123683	5693432	0,75; 1,0; 1,25

Численное исследование параметрической области опрокидывания контура и анализ результатов

Численное моделирование выполнено в расчетной области со следующими геометрическими размерами: длина — $5\lambda_r$; высота — $0,75\lambda_r$; глубина воды — $0,5\lambda_r$, что соответствует условию глубокой воды. Сеточное разбиение выполнено элементами со стороной 0,5 м. Плотность воды выбрана равной 1027 кг/м^3 ; ускорение свободного падения — $9,81 \text{ м/с}^2$.

На рис. 2 показана временная последовательность фрагментов вычисленных профилей «волны-убийцы» с длиной центральной волны 138 м. «Волны-убийцы» (см. табл. 1) имеют аналогичную последовательность и форму профилей, но различные значения относительных абсцисс

$\xi_2 - \xi_5$, вычисляемых в соответствии с выражением $\xi_i = \Delta x_i / \lambda_r$, где Δx_i — расстояние до абсциссы соответствующего профиля «волны-убийцы», $i = 2 \dots 5$ — номера профилей (см. рис. 2), λ_r — длина центральной волны.

Ранее отмечалось, что вычисление коэффициента масштабирования выполнено по отношению ко второму максимуму каждой базовой волны, что вполне оправдано, так как максимальная скорость воды в профиле второго максимума в 1,5 раза превышает аналогичную скорость воды в профиле первого максимума.

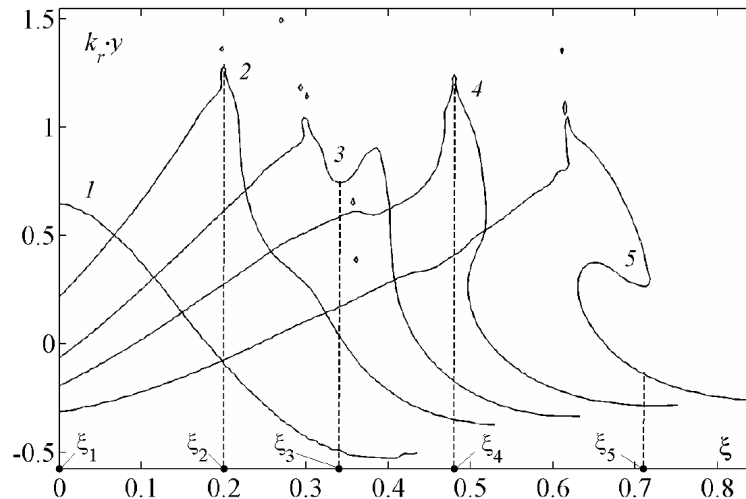


Рис. 2. Временная последовательность фрагментов профилей «волны-убийцы». Относительные значения абсцисс положений профилей: ξ_1 — начального профиля 1; ξ_2 — профиля с первым максимумом 2 высоты; ξ_3 — «двугорбый» профиля 3; ξ_4 — профиля со вторым максимумом 4 высоты; ξ_5 — поверхности воды под зарождающимся ныряющим буруном 5;

$k_r = 2\pi/\lambda_r$ — волновое число, λ_r — длина центральной волны; y — ордината в системе координат oxy

Вариация параметров обеспечена при использовании «волн-убийц» с различной длиной центральных волн (см. табл. 1); контуров с различной массой и начальной метацентрической высотой (см. табл. 2), а также выбором одной из относительных абсцисс профилей (см. рис. 1 — относительные абсциссы $\xi_2 - \xi_5$ профилей) в качестве начального удаления контура от «волны-убийцы», что обеспечило вариацию времени опрокидывающего воздействия «волны-убийцы» при изменении начального удаления контура.

Результаты вычислений для каждого из контуров собраны в матрицу, строки которой соответствуют крутизне S_m (см. табл. 2) «волны-убийцы», столбцы — значениям относительных абсцисс $\xi_2 - \xi_5$. Для наглядности результаты по каждому контуру представлены в виде геометрической интерпретации матрицы (рис. 3 – 5), элементы которой обозначены точками на сетке, образованной пересечением строк и столбцов. На указанную сетку наложены три многоугольника, на границе и внутри каждого из которых находятся элементы матрицы, соответствующие опрокидыванию контура (угол крена контура превышает 80°) с определенным значением начальной метацентрической высоты (см. табл. 2). Таким образом, каждую таблицу характеризуют четыре параметра: масса контура, начальная метацентрическая высота (определяется многоугольником), длина центральной волны и начальное удаление контура от «волны-убийцы» (определяются значениями λ_r и ξ).

Параметрическая область опрокидывания контура (см. рис. 3) с начальной метацентрической высотой 0,5 м ограничена многоугольником $ABCDEFGHIJKL$. Многоугольник $BCDEFGHJKL$ ограничивает параметрическую область опрокидывания контура с начальной метацентрической высотой 0,75 м; многоугольник $BCDEFGHJK$ ограничивает параметрическую область опрокидывания контура с начальной метацентрической высотой 1,0 м. Увеличение метацентрической высоты до 0,75 – 1,0 м исключает опрокидывание контура судна водоизмещением 1389 т первым макси-

мумом ξ_2 «волной-убийцей» (на рис. 3 из параметрической области опрокидывания исключаются точки A и L) с длиной её центральной волны 174 м и 149 м соответственно.

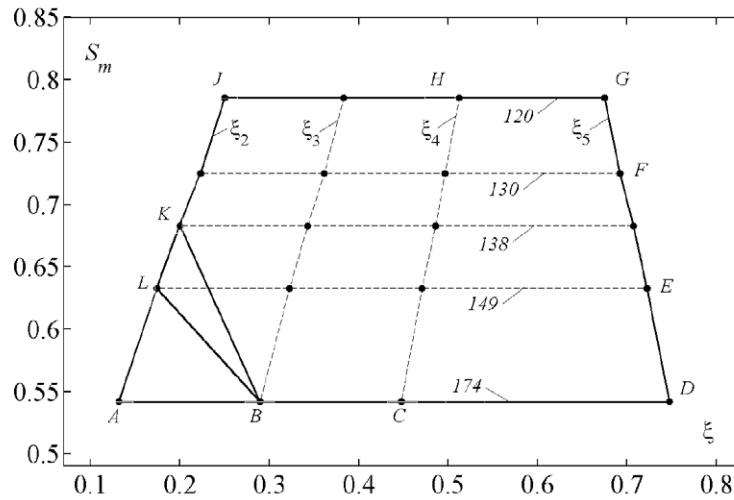


Рис. 3. Параметрическая область опрокидывания контура морского судна водоизмещением 1389 т и начальными метацентрическими высотами 0,5 м и 0,75 м, 1,0 м:
 ξ_2, \dots, ξ_5 — относительные абсциссы начального положения контура;
 обозначение строк — 120, ..., 174 м — длины λ_p центральных волн;
 S_m — максимальная крутизна «волны-убийцы» в момент достижения высоты 30 м

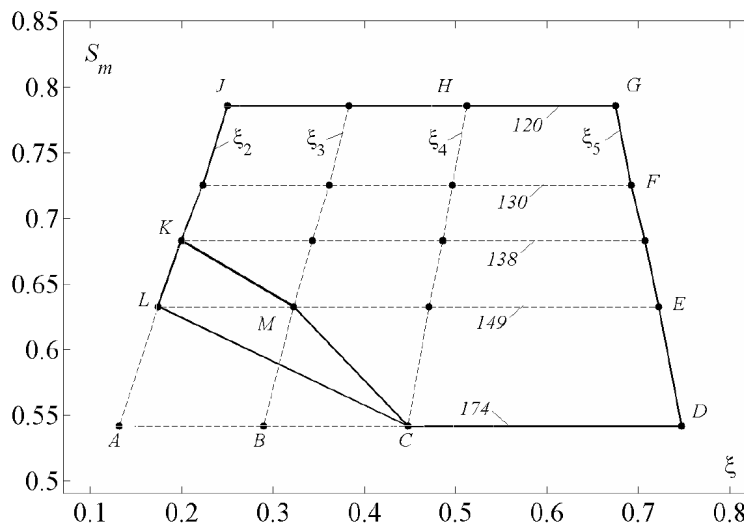


Рис. 4. Параметрическая область опрокидывания контура морского судна водоизмещением 4947 т с начальными метацентрическими высотами 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м:
 ξ_2, \dots, ξ_5 — относительные абсциссы начального положения контура;
 обозначение строк — 120, ..., 174 м — длины λ_p центральных волн;
 S_m — максимальная крутизна «волны-убийцы» в момент достижения высоты 30 м

Параметрическая область опрокидывания контура (см. рис. 4) с начальной метацентрической высотой 0,75 м ограничена многоугольником $CDEFGHJKL$. Многоугольник $CDEFGHJKM$ ограничивает параметрическую область опрокидывания контура с начальными метацентрическими высотами 1,0 м и 1,25 м. Из анализа параметрических областей следует, что контур судна водоизмещением 4947 т с метацентрической высотой 0,75 м устойчив к опрокидыванию первым ξ_2 максимумом и двугорбым ξ_3 профилем (на рис. 4 из параметрической области опрокидывания исключаются точки A и B) «волной-убийцей» с длиной центральной волны 174 м. Дальнейшее

увеличение метацентрической высоты до 1,0 м и 1,25 м дополнительно исключает опрокидывание контура первым ξ_2 максимумом «волны-убийцы» (на рис. 4 исключается точка L) с длиной центральной волны, равной 149 м.

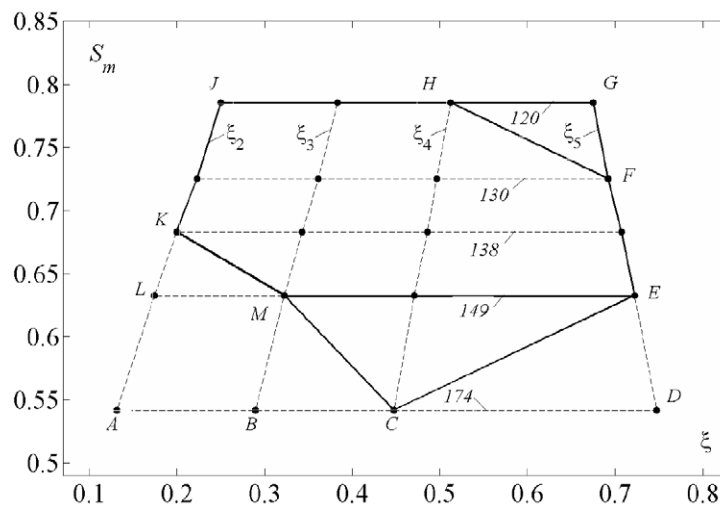


Рис. 5. Параметрическая область опрокидывания контура морского судна водоизмещением 9260 т и начальными метацентрическими высотами 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м:

ξ_2, \dots, ξ_5 — относительные абсциссы начального положения контура;
обозначение строк: 120 – 174 м — длины λ_r центральных волн;

S_m — максимальная крутизна «волны-убийцы» в момент достижения высоты 30 м

Параметрическая область опрокидывания контура (см. рис. 5) с начальной метацентрической высотой 0,75 м и 1,0 м ограничена многоугольником $CEFGHJKM$. Многоугольник $KMEFHJ$ ограничивает параметрическую область опрокидывания контура с начальной метацентрической высотой 1,25 м. Из рис. 5 следует, контур судна водоизмещением 9260 т с метацентрическими высотами 0,75 м и 1,0 м устойчив к опрокидыванию первым ξ_2 максимумом (на рис. 5 из параметрической области опрокидывания исключаются точки A, L) «волн-убийц» с длиной центральных волн 174 м и 149 м, двугорбым ξ_3 профилем и ныряющим буруном ξ_5 (на рис. 5 исключаются точки B и D) «волны-убийцы» с длиной центральной волны 174 м. Дальнейшее увеличение метацентрической высоты до 1,25 м дополнительно исключает опрокидывание контура вторым ξ_4 максимумом (на рис. 5 исключается точка C) «волны-убийцы» с длиной центральной волны 174 м, а также ныряющим буруном ξ_5 (на рис. 5 исключается точка G) «волны-убийцы» с длиной центральной волны 120 м, что объясняется кратковременностью воздействия на контур обрушающегося ныряющего буруна.

Причины расширения параметрической области опрокидывания контура:

- уменьшение момента инерции при снижении массы контура;
- снижение сопротивляемости опрокидыванию при уменьшении начальной метацентрической высоты контура;
- увеличение времени опрокидывающего воздействия «волны-убийцы» при уменьшении начального удаления контура;
- увеличение крутизны «волны-убийцы» при уменьшении длины её центральной волны.

Таким образом, технология параметрического моделирования в совокупности с моделью системы «контур морского судна — «волна-убийца»», представляет собой параметрическую модель опрокидывания контура морского судна «волнами-убийцами».

Выводы

1. Результаты работы показали, что «волна-убийца» с момента возникновения развивается в течение одного периода и пробегает расстояние, равное длине её центральной волны. Силь-

ные нелинейные преобразования формируют последовательно пять типичных профилей «волн-убийц»: начальный профиль, первый максимум, двугорбый профиль, второй максимум и ныряющий бурун. Процессы внутри параметрической модели опрокидывания контура морского судна «волнами-убийцами» зависят от сочетания четырех параметров: массы контура, начальной метацентрической высоты контура, длины центральной волны, начального удаления контура от «волн-убийцы».

2. Методом вычислительной гидродинамики выполнена оценка параметрических областей опрокидывания контуров морских судов водоизмещением от 1000 до 10000 т с начальными метацентрическими высотами 0,5 – 1,25 м на «волнах-убийцах» длиной 120 – 174 м, при этом выбор начального удаления контуров обеспечивал воздействие на них «волн-убийц» в моменты формирования соответствующих профилей.

3. Каждый из рассмотренных параметров оказывает существенное влияние на опрокидывание контура. Так, устойчивость контуров к опрокидыванию возрастает с увеличением их массы и увеличением начального удаления контура за счет увеличения инерционности и сокращения времени опрокидывающего воздействия «волн-убийцы». Увеличение длины центральной волны снижает опрокидывающие свойства «волн-убийцы» за счет уменьшения её кривизны. Увеличение начальной метацентрической высоты также существенным образом увеличивает сопротивляемость контура судна опрокидыванию «волной-убийцей». Соблюдение этого правила особенно важно для рыбопромысловых судов, которые регулярно принимают на борт тралы и перемещают в трюмах улов, что зачастую вызывает уменьшение метацентрической высоты судна, создающее предпосылки к опрокидыванию судна на морском волнении.

4. Полученные результаты могут быть использованы для разработки мер безопасности при организации рыбного промысла и морских перевозок, а также при проектировании морских судов.

*Результаты получены с использованием оборудования
ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куркин А. А. «Волны-убийцы»: факты, теория и моделирование / А. А. Куркин, Е. Н. Пелиновский. — Н. Новгород: ННГТУ, 2004. — 158 с.
2. Захаров В. Е. Устойчивость периодических волн конечной амплитуды на поверхности глубокой жидкости / В. Е. Захаров // Журнал прикладной механики и технической физики. — 1968. — Т. 9. — № 2. — С. 86–94.
3. Rosenthal W. Rogue Waves: Results of the MaxWave Project / W. Rosenthal, S. Lehner // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2008. — Vol. 130. — Pp. 1–8.
4. Nikolkina I. Rogue waves in 2006–2010 / I. Nikolkina, I. Didenkulova // Natural hazards and Earth system sciences. — 2011. — Vol. 11. — Pp. 2913–2924.
5. Minami M. Study of ship responses and wave loads in the freak wave / M. Minami, H. Sawada, K. Tanizawa // The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. — San Francisco: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2006. — Pp. 272–278.
6. Buca M. P. Nonlinear Ship Rolling and Capsizing / M. P. Buca, I. Senjanovic // Brodogradnja. — 2006. — № 4 (57). — Pp. 321–331.
7. Ferziger J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger. — Berlin: Springer, 2002. — 431 p.
8. Yakhot V. Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic theory / V. Yakhot, S.A. Orszag // Journal of scientific computing. — 1986. — Vol. 1. — N. 1. — Pp. 3–51.
9. Fonseca N. Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions / N. Fonseca, C. Soares, R. Pascoal // Journal of marine science and technology. — 2006. — Vol. 11. — N. 4. — P. 245–259.
10. Флот рыбной промышленности: справочник типовых судов. — М.: Транспорт, 1990. — 381 с.
11. Кулагин В. Д. Теория и устройство морских промысловых судов / В. Д. Кулагин. — Л.: Судостроение, 1974. — 440 с.

ESTIMATION OF PARAMETRIC RANGE OF CAPSIZING OF SEAGOING VESSEL CONTOUR IN “ROGUE WAVE”

On the basis of computational fluid dynamics has been created a virtual model of basin and calculation of capsizing marine vessel contour was performed. The type and parameters of the “rogue wave” with one central maximum height of 30 meters and two side elevations was substantiated. Initial and boundary conditions to ensure the generation of “rogue waves” in the computational domain and capsizing of contour have been formulated. Registration of the calculated parameters of the contour motion was executed at each step of solver. The main parameters that affect the stability of the contour in “rogue wave” were listed. There are: mass of the contour, its initial metacentric height, length of the “rogue wave” and the initial distance from the contour to the “rogue wave”. For all combinations of these parameters heeling angles of contours were calculated and parametric regions corresponding to the contour capsizing was formed. Reduction of the contour mass, its initial metacentric height, initial distance from contour to the “rogue wave” and its wavelength makes contribution to the capsizing of contour. These results can be used in the design of ships and to develop measures to ensure the marine safety.

Keywords: “rogue wave”, computational fluid dynamics, contour of the vessel, capsizing of the contour, metacentric height of the contour, heeling angle.

REFERENCES

1. Kurkin, A. A., and E. N. Pelinovskij. “Volny-ubijcy”: fakty, teorija i modelirovanie. N. Novgorod: NNGTU, 2004.
2. Zaharov, V. E. “Ustojchivost periodicheskikh voln konechnoj amplitudy na poverhnosti glubokoj zhidkosti.” *Zhurnal prikladnoj mekhaniki i tekhnicheskoy fiziki* 9.2 (1968): 86–94.
3. Rosenthal, W., and S. Lehner. “Rogue Waves: Results of the MaxWave Project.” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 130 (2008): 1–8.
4. Nikolchina, I., and I. Didenkulova. “Rogue waves in 2006–2010.” *Natural hazards and Earth system sciences* 11 (2011): 2913–2924.
5. Minami, M., H. Sawada, and K. Tanizawa. “Study of ship responses and wave loads in the freak wave.” *The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. San Francisco: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2006: 272–278.
6. Buca, M. P., and I. Senjanovic. “Nonlinear Ship Rolling and Capsizing.” *Brodogradnja* 4(57) (2006): 321–331.
7. Ferziger, J. H. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer, 2002.
8. Yakhot, V., and S.A. Orszag. “Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic theory.” *Journal of scientific computing* 1.1 (1986): 3–51.
9. Fonseca, N., C. Soares, and R. Pascoal. “Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions.” *Journal of marine science and technology* 11.4 (2006): 245–259.
10. *Flot rybnoj promyshlennosti. Spravochnik tipovyh sudov*. M.: Transport, 1990.
11. Kulagin, V. D. *Teoriya i ustrojstvo morskikh promyslovyh sudov*. L.: Sudostroenie, 1974.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дорожко Вениамин Мефодьевич —
кандидат физико-математических наук.
ИАПУ ДВО РАН
veniamin_dorozhko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dorozhko Veniamin Mefod'evich — PhD.
Institute of automation and control processes
of Far Eastern Branch of RAS
veniamin_dorozhko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2015 г.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ПОРТА НА ОСНОВЕ ПРИОРИТЕТА ГРУЗОПОТОКОВ

В работе проведен анализ разработанной автором имитационной модели развития портов. Выявлено, что в определенный момент времени наступает предел в увеличении объема обрабатываемых в порту грузов, связанный с ограничением возможности расширения порта и, как следствие, с возможностью перегрузки на причалах только определенного количества груза. Обоснована необходимость внесения дополнений в созданную модель для выявления приоритетов развития определенных грузопотоков в рамках ограниченных возможностей порта. Разработан и обоснован алгоритм работы имитационной модели, выявляющий направление развития порта. Проведены испытания работы модели при различных вариантах воздействия ограничений. Определена адекватность работы имитационной модели в условиях введенных ограничений. Показано, что предложенная в работе модель является математическим аппаратом, учитывающим влияние внешних сил. Предложенная модель объясняет существующее состояние порта и причины, которые привели к этому, в реальных условиях воздействия на систему внешних факторов. В зависимости от введенных приоритетов модель определяет направление развития порта, что особенно ценно для её практического применения.

Ключевые слова: порт, терминал, имитационная модель, логистика, грузопотоки, обработка груза, причал.

Введение

С развитием грузопотоков в определенный момент времени наступает предел в увеличении объема обрабатываемых портом грузов при условии невозможности дальнейшего расширения порта. Если порт не может увеличивать объем обрабатываемого груза хотя бы по одному из обслуживаемых видов груза, то непринятая им часть грузопотока будет перемещаться в другой порт побережья, где грузопоток продолжит свое существование и рост. Этапы такого сценария развития портов побережья, а также этапы развития отношений между портами и портовыми городами, исторически связанные между собой, подробно описаны как в монографиях Конференции ООН по торговле и развитию (UNCTAD), так и в работах российских авторов [1] – [3]. В вопросе развития грузопотоков и их влияния на территориальное и техническое развитие портов авторами работ было уделено особое внимание модели развития портов «WORKPORT» [4]. Развитие грузопотоков было признано ими основной движущей силой развития портов. В других существующих моделях и концепциях развития портов, рассмотренных в работе [5], наряду с такими факторами, как, например, развитие специализированного флота, отмечается значимость влияния грузопотоков на развитие портов.

Порты, принявшие неосвоенную, «свободную» часть грузопотока, вероятно, в дальнейшем вступят в конкуренцию с первоначальным портом уже за освоенную и обрабатываемую им часть этого грузопотока. Это может произойти в случае организации более эффективной обработки груза в других портах и возникновения, так называемого *эффекта экономии от масштаба*, когда этот другой порт, в силу привлечения значительного грузопотока, становится способным предложить более привлекательные условия обработки груза, чем первоначальный порт. Возможность такого развития уже была рассмотрена в предыдущих работах автора [6], [7]. Таким образом, порт, отвергая часть грузопотока, вероятно, закладывает основу будущей конкурентной борьбы за освоенные грузопотоки.

В связи с ранее изложенным необходимо тщательно подходить к выбору путей развития порта и взвешенно принимать решение об отказе от дальнейшего развития того или иного грузопотока в рамках данного порта. Иными словами, необходим механизм выбора приоритета грузопотоков при их росте в будущем, что означает потребность в методологии определения специализации порта.

Специализация порта

Концепция специализации порта. Очевидно, приоритет в развитии грузопотока будет связан с экономическими факторами доходности от обработки груза в порту — насколько порту будет выгоден тот или иной грузопоток. В работах [1] – [3] обосновано, что финансовый результат эксплуатации причалов по типам груза зависит от двух составляющих: дохода за обработку одной тонны груза на причале и количества тонн данного груза, обрабатываемого в определенный период времени на специализированном причале [8] – [10]. Доход от обработки одной тонны определяется как разница между ценой и себестоимостью обработки одной тонны груза на причале. *Цена* — это рыночная ставка, оплачиваемая порту грузовладельцем за обработку одной тонны груза. *Себестоимость* подразумевает расходы порта на переработку одной тонны этого груза.

Количество груза, обрабатываемого на причале за определенный отрезок времени, можно выразить через грузоподъемность специализированных судов, доступных для перевозки этого груза, как по их наличию, так и по возможности обработки на существующих специализированных причалах. Таким образом, будет сохранено влияние ранее введенных в модель развития порта ограничений. Это количество определяется как по наличию судов, так и по возможности обработки на существующих причалах. На рис. 1 приведена блок-схема части имитационной модели, определяющей выбор специализации порта.

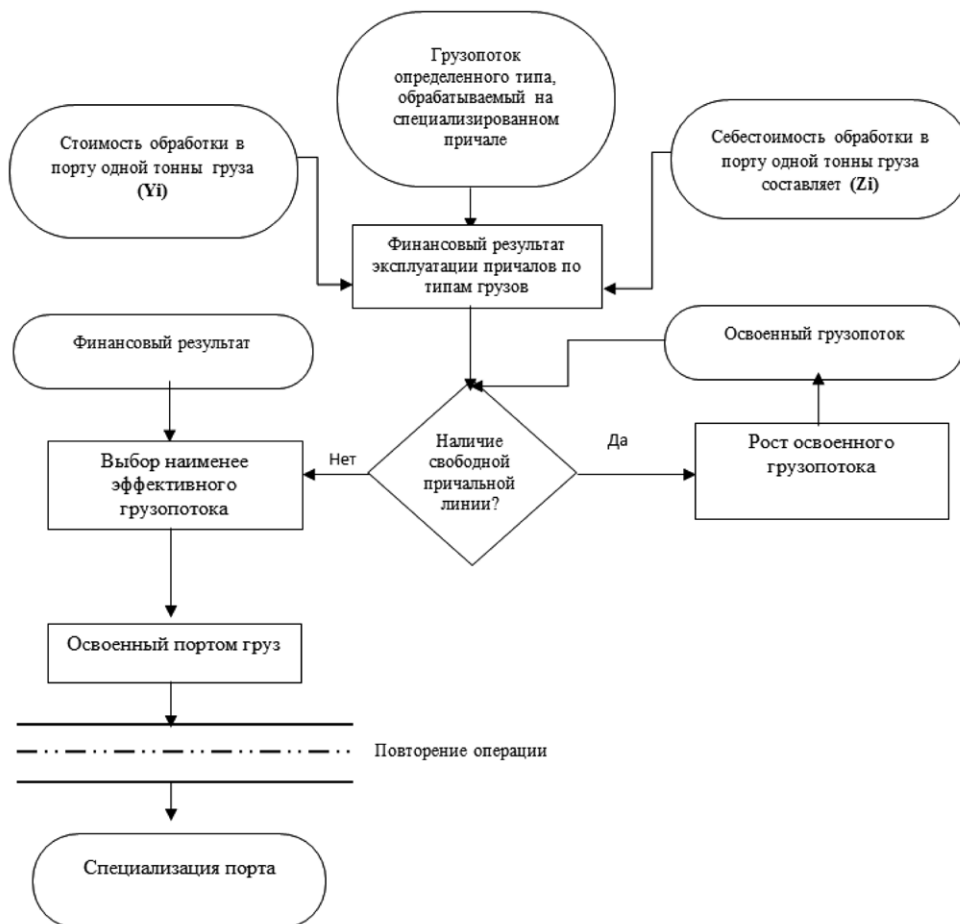


Рис. 1. Блок-схема определения специализации порта

Установление адекватности модели специализации порта. До исчерпания возможности расширения порта, происходит обработка всех предлагаемых грузов. С момента, когда суммарная потребность в причальной линии достигнет максимально возможного значения, начинается процесс отказа от обработки того или иного груза в зависимости от приоритетов порта и существующих в порту ограничений. Сравнение происходит циклично при росте грузопотоков.

Таким образом, наблюдается отказ от менее выгодных для данного порта грузов, порт обретает свою специализацию, т. е. вступает в очередной этап своего развития. Для установления адекватности работы алгоритма было смоделировано несколько ситуаций развития грузопотоков и освоения их портом, определены значения экономического параметра «дохода порта от обработки каждого из грузопотоков» в следующем порядке по убыванию: контейнерный грузопоток, грузопоток укрупненных единиц, навалочный груз, наливной и генеральный грузы. Размер развития порта был условно ограничен причальной линией, рассчитанной в среднем на пятнадцать причалов.

Рассмотрим наиболее типичные ситуации развития грузопотоков и освоения их портом.

1. *Ограничение по наличию флота.* На рис. 2 приведен график, отражающий развитие ситуации с заполнением причалов порта при ограничении доступного тоннажа, когда для вывоза каждого из грузопотоков имеется ограниченное число судов определенной вместимости. Как видно из графика, использование причальной линии в максимуме достигает всего семи причалов из доступных пятнадцати, что является естественным в связи с введенными ограничениями по доступному флоту. Соответственно развитие грузопотоков и порта ограничено имеющимся флотом и его размерами.

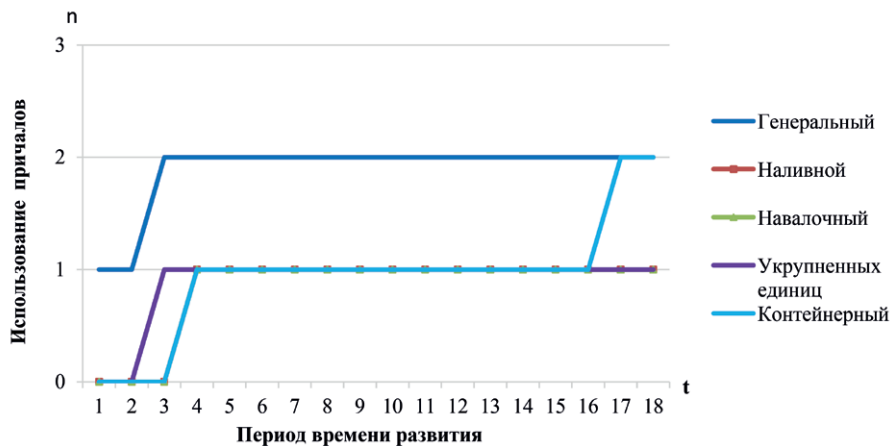


Рис. 2. График развития порта при ограничении наличия судов

На рис. 3 приведена схема развития порта при ограничении наличия судов. В некотором условном виде высота прямоугольников означает размер данного грузопотока через порт.

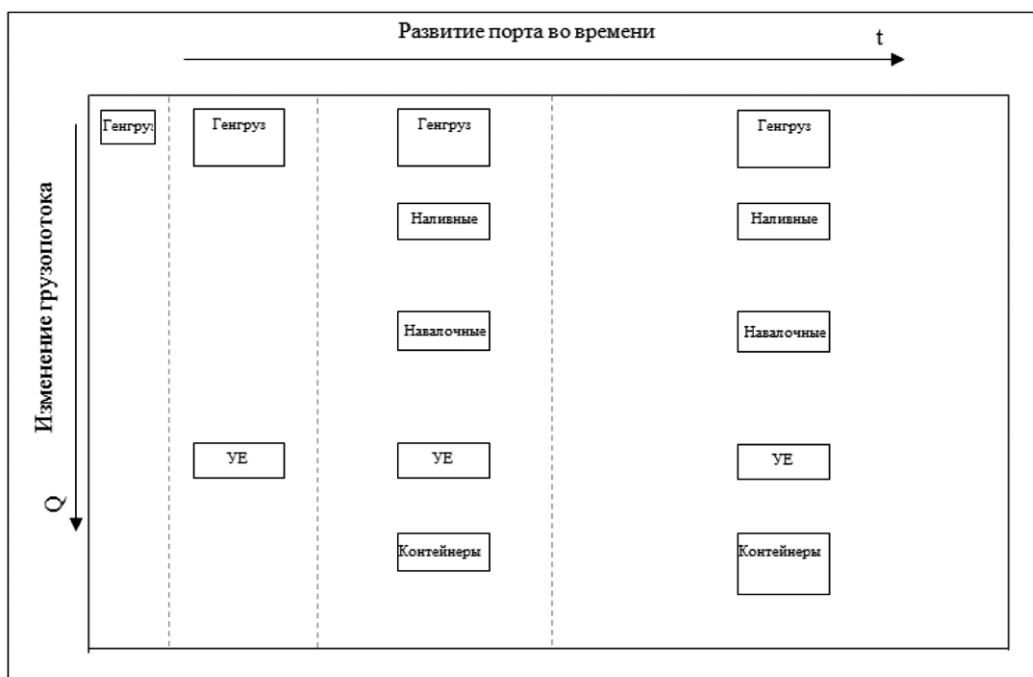


Рис. 3. Схема развития порта при ограничении наличия судов

Как видно из схемы, грузопоток всех видов грузов достигает определенного размера, на этом развитие в освоении причальной линии останавливается. Прекращение развития свидетельствует о том, что возможности имеющегося флота исчерпаны и дальнейший рост при данных условиях невозможен, хотя физически порт может расширяться и принимать дополнительно грузы.

2. Развитие грузопотока вне ограничения флота. На рис. 4 смоделирован график роста занятости причальной линии при умеренном развитии грузопотока и отсутствии ограничения со стороны используемого флота. Происходит постепенный рост занятости причальной линии, обусловленный ростом грузопотока, который в рассматриваемый момент времени достигает четырнадцати причалов из доступных пятнадцати. Дальнейшее развитие порта подразумевает выбор приоритетных грузопотоков.

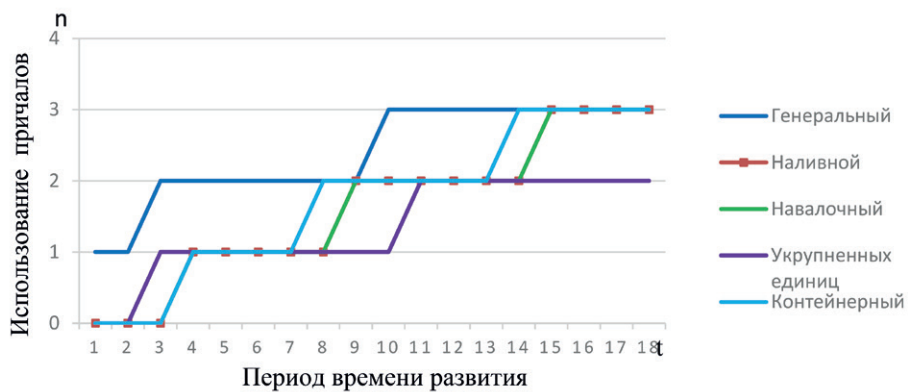


Рис. 4. График развития порта при росте грузопотоков

На рис. 5 приведена схема развития порта при росте грузопотоков. В некотором условном виде высота прямоугольников означает размер грузопотока, обрабатываемого портом. Схема развития порта демонстрирует постепенный рост грузопотоков всех видов грузов и заполнение причальной линии порта.

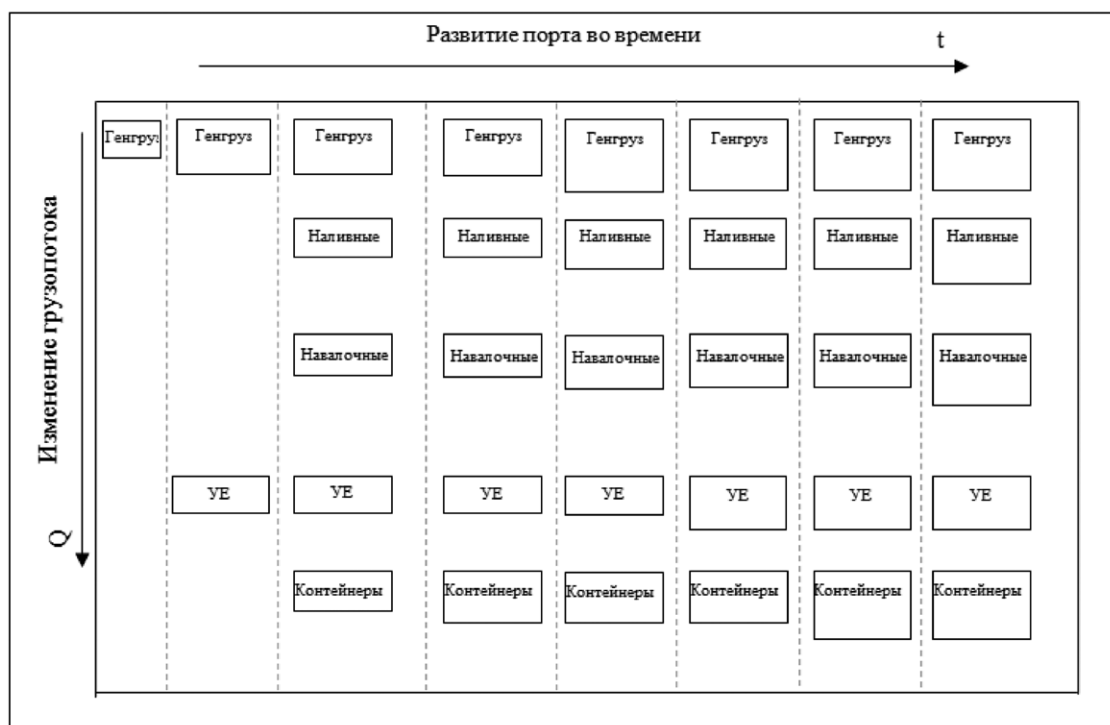


Рис. 5. Схема развития порта при росте грузопотоков

3. *Агрессивное развитие грузопотоков.* На рис. 6 приведен график использования причалов, где наблюдается нехватка причальной линии, т. е. порт не в состоянии вместить весь грузопоток, и происходит постепенное вытеснение с причальной линии менее доходных грузов в пользу более доходных. В зависимости от величины причальной линии, скорости роста отдельных грузопотоков и доходности от обработки грузопотоков все причалы могут быть заняты только одним видом груза. В этом случае порт может стать узкоспециализированным, связанным с обработкой только одного грузопотока, как и показано на графике. Это происходит тогда, когда нехватка причальной линии приводит к вытеснению всех грузопотоков одним наиболее доходным видом груза.

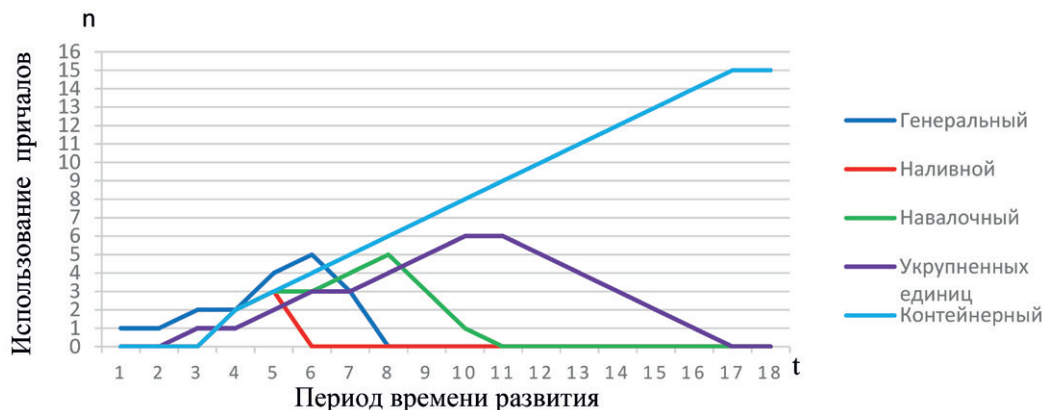


Рис. 6. График развития порта при агрессивном росте грузопотоков

На рис. 7 приведена схема развития порта при агрессивном росте грузопотоков. В некотором условном виде высота прямоугольников означает размер данного грузопотока, обрабатываемого портом.

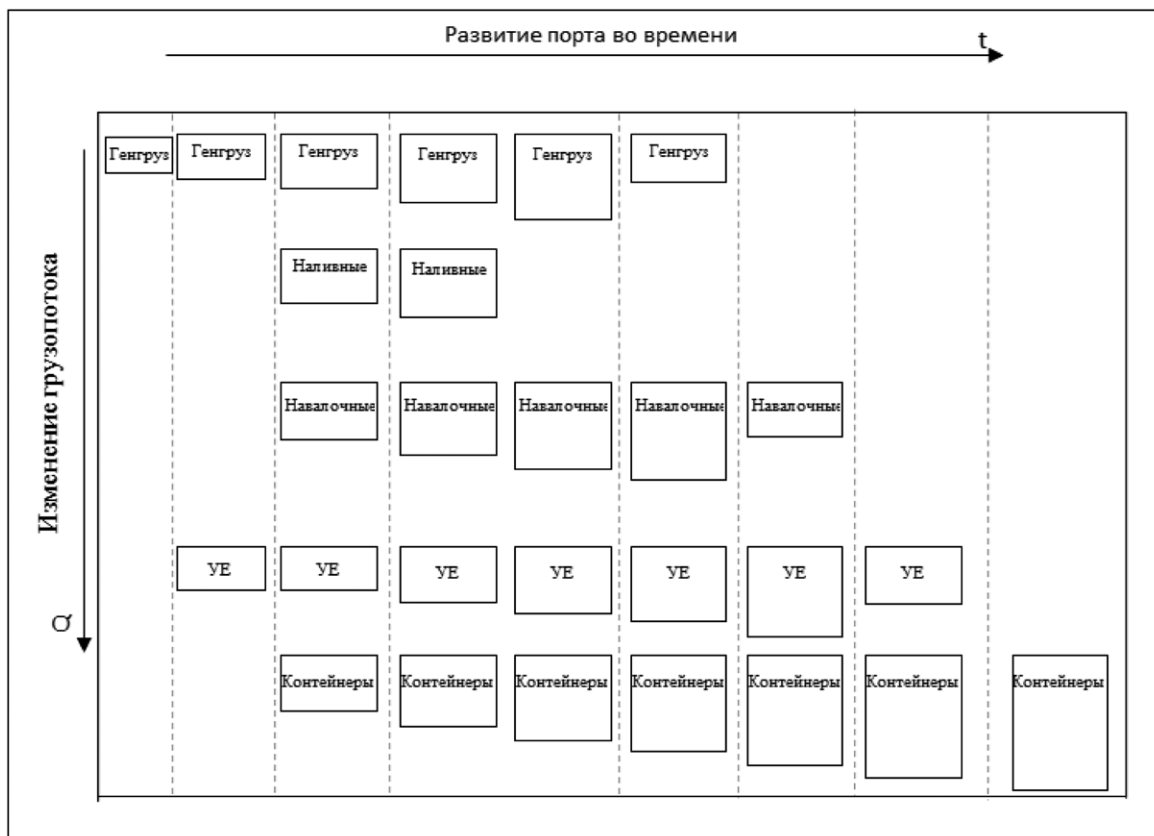


Рис. 7. Схема развития порта при агрессивном росте грузопотоков

Схема развития порта отображает ситуацию, когда при агрессивном росте грузопотоков и ограниченных возможностях порта он может стать узкоспециализированным портом, связанным с обработкой только одного грузопотока, как и показано на схеме развития, когда постепенно все грузопотоки вытесняются одним наиболее перспективным для данного порта.

Выводы

1. Представленная в работе часть модели развития порта является завершающим этапом количественной модели развития порта. В процессе работы над завершающей частью модели были сформулированы причины приоритета выбора того или иного грузопотока при развитии порта. Разработан и представлен алгоритм выбора грузопотоков, который выполнен с учетом введенных ранее ограничений в модель развития порта, расчет количества обрабатываемого груза связан с наличием и размерами специализированных судов, предназначенных для перевозки конкретного вида грузов.

2. Проведенные эксперименты с измененной моделью доказали ее работоспособность и адекватность. Таким образом, доказано, что представленная модель позволяет имитировать развитие порта, просчитывать различные варианты развития и принимать целесообразные и своевременные решения в области направления развития.

3. С помощью имитационной модели появляется возможность определять инвестиционные программы развития порта, осуществлять контроллинг развития порта и вносить своевременные изменения в программы развития.

4. При достижении стадии развития «специализация» происходит переход на другой уровень развития всей портовой системы региона. В дальнейшем развитие порта необходимо рассматривать в совокупности с развитием других региональных портов (кластеров) как единого целого в развитии и обслуживании всего регионального грузопотока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Port development. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.
2. Sustainable development strategies for cities and ports: monographs. — United Nation, Geneva: UNCTAD, 1996. — 125 p.
3. 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.
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. — Is. 2. — Pp. 93–107. DOI: 10.1080/0308883042000205061.
5. 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.
6. Галин А. В. Обобщенная имитационная модель процессов развития портов / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 43–51.
7. Галин А. В. Воздействие ограничений на обобщенную имитационную модель процесса развития портов / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 7–14.
8. Кириченко А. В. Анализ моделей терминальной перевозки грузов в транспортной логистике / А. В. Кириченко // Материалы XIV Международной научно-практической 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.

DEVELOPMENT OF A PORT SPECIALIZATION MODEL BASED ON THE PRIORITY OF CARGO FLOWS.

The analysis of a port development imitational model designed by author was done. It is revealed that at some time there comes a limit in the increasing of the volume of cargo handled at the port. This limit is connected with the possibility of port expansion and possibility of cargo handling on the piers a certain quantity of cargo. The necessity of making additions in established model for identifying development priorities to certain traffic flows within the limited capacity of the port was done. Developed and proved the algorithms which were used in the imitation model, identifying the direction of port development. The tests of the model in different types of exposure limits were done. The adequacies of the imitational model in a new environment were determined. The model proposed in the paper is a mathematical apparatus that takes into account the influence of external forces. The model explains the current port status and the causes that led to it, implements it in real conditions the system is exposed to external factors. In addition, depending on the model introduced in priorities, defines the direction of port development, which is the most valuable for practical application.

Keywords: port, terminal, imitation model, logistics, cargo flows, cargo handling, berth, pier.

REFERENCES

1. *Port development*. New York: UNCTAD, 1985.
2. *Sustainable development strategies for cities and ports: Monographs*. United Nation, Geneva: UNCTAD, 1996.
3. 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.
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. DOI: 10.1080/0308883042000205061.
5. 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.
6. 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.
7. Galin, A. V. "The restrictions effect on a generalized imitation model of the development process of ports." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 7–14.
8. Kirichenko, A. V. "Analysis of models of terminal transportation of goods in transport logistics." *Materials of XIV International scientific and practical conference*. SPb., 2015: 183–187.
9. Kuznetsov, A. L., and E. Yu Kozlova. "Basic model of logistical flows through container terminal." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2(52) (2008): 18–20.
10. Kuznetsov, A. L., and V. A. Bludkina. "Imitacionnoe modelirovanie kak instrument proektirovanija morskikh i nazemnyh kontejnernih terminalov." *Tezisy докладов 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»
Galina2403@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Galina Aleksandr Valentinovic —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
Galina2403@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25 января 2016 г.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СУДОХОДСТВА

В настоящей статье проанализирована проблема экологической безопасности судоходства, которая должна быть обеспечена в соответствии с требованиями современного законодательства в области судоходства и охраны окружающей среды. Обеспечение экологической безопасности представляет собой соответствующую деятельность, обеспечивающую организацию и управление. Организация этой деятельности предполагает разработку и осуществление комплекса действий, а также применение технических средств. Кроме того, эффективное осуществление данного рода деятельности требует управления этой деятельностью и обеспечивается с помощью системы управления. Предложен алгоритм разработки системы управления, включая проработку основных организационных мероприятий и рекомендаций по выбору комплекса технических средств для обеспечения экологической безопасности с учетом конкретных условий судоходства, а также вида загрязнения, которое предложено рассматривать как загрязнение «эксплуатационное» и «аварийное». С учетом такой классификации предложена формулировка целей управления экологической безопасностью. Существенное внимание уделено мотивационному фактору обеспечения экологической безопасности судоходства.

Ключевые слова: экологическая безопасность, судоходство, аварийное и эксплуатационное загрязнение, управление.

Введение

В настоящее время все большее применение в сфере организации эксплуатации судов находит система управления безопасностью при судоходстве (СУБ). Необходимость создания и использования СУБ при организации деятельности судовладельческих компаний определяется, прежде всего, требованиями Кодекса внутреннего водного транспорта Российской Федерации (ст. 34) [1], а также формирующимся в обществе пониманием актуальности вопросов обеспечения безопасности на транспорте и растущим желанием повысить её уровень.

Безопасность судоходства предполагает безопасность людей и окружающей природной среды, а также судна и груза. Это взаимосвязанные понятия и сферы деятельности. Зачастую обеспечение безопасности судна одновременно означает безопасность, например, окружающей природной среды. Как следует из ранее изложенного, одной из составляющих безопасности судоходства в целом является *экологическая безопасность*. Обеспечение экологической безопасности судоходства является определенным видом деятельности, которая должна быть управляемой, откуда возникает другой вид деятельности — *управление экологической безопасностью*. Опыт в этой области организации судоходства постепенно накапливается, поэтому предлагаемая статья посвящена вопросам разработки системы управления экологической безопасностью как составляющей общей системы управления безопасностью судоходства.

Основная часть

Анализ словосочетания «управление экологической безопасностью» показывает на наличие двух основных понятий: *управление* и *экологическая безопасность*. В целом управление представляет собой совокупность действий, направленных на достижение ранее поставленной цели. В данном случае — при управлении экологической безопасностью судоходства, имеется совокупность действий, направленных на предотвращение загрязнения окружающей среды при эксплуатации судна. Как видно ранее изложенного, обеспечение экологической безопасности в нашем случае — это то же понятие, что и «предотвращение загрязнения окружающей среды при судоходстве». Однако при этом сразу возникает вопрос о том, что значит *обеспечение экологической безопасности*

или предотвращение загрязнения окружающей среды. Последнее обстоятельство является очень важным, так как обеспечение экологической безопасности можно понимать по-разному (например, как полное предотвращение загрязнения окружающей природной среды). Поэтому целесообразно исходить из того, что экологическая безопасность — это такое состояние объекта, которое характеризуется соответствием требованиям норм природоохранного права в исследуемой области. Отсюда целью управления экологической безопасностью судоходства является выполнение требований природоохранного законодательства при организации судоходства. Однако такая формулировка цели будет справедливой для так называемого *эксплуатационного загрязнения*. Для аварийного загрязнения окружающей среды с учетом анализа природоохранной законодательной базы в области регулирования аварийного загрязнения цель управления экологической безопасностью должна включать два аспекта: первый — выполнение требований природоохранного законодательства (последние в каком-то виде все же существуют), второй — предотвращение возникновения или снижение вероятности аварийного загрязнения, и снижение ущерба от аварийного загрязнения. При этом невозможно не заметить некоторое противопоставление двух основных аспектов (сторон) деятельности в области обеспечения экологической безопасности при аварийном загрязнении окружающей среды. В данном противопоставлении нет ничего алогичного, так как, с одной стороны, природоохранное законодательство пока отражает далеко не все стороны аварийного загрязнения окружающей среды при судоходстве, а с другой стороны, последнее не означает, что предотвращение аварийного загрязнения может быть не включено в сферу природоохранной деятельности судоходства.

Процесс управления можно характеризовать как процесс создания (осуществления) таких информационных потоков, которые приводят к достижению цели. К таким информационным потокам относятся управленческие решения, а также информация о состоянии объекта управления, которая позволяет оценить эффективность управляющих воздействий. Однако указанные потоки информации не могут существовать сами по себе. Поэтому процесс управления включает в себя не только организацию информационных потоков, но и объект, субъект управления, средства передачи информации, а также собственно те действия, которые осуществляются системой управления. К таким действиям относятся:

- выработка субъектом управления управленческих решений;
- передача с помощью комплекса технических средств управленческих решений объекту управления;
- реализация объектом управления управленческих решений;
- осуществление контроля результатов реализации управленческих решений;
- анализ результатов контроля;
- корректировка управляющего воздействия на объект управления.

Однако для организации эффективного управления очень важным является еще один фактор — мотивация ранее указанных действий. Последнему часто не придается достаточное значение и не уделяется требуемое внимание. Мотивация к действиям, которые выполняются или должны выполняться в процессе управления, обеспечивается (формируется) с помощью различных механизмов управления поведением людей. В данном случае наиболее существенную роль будет играть такой фактор, как наказание за невыполнение требований законодательства и распоряжений руководства предприятия (судовладельческой компании). Учитывая цели настоящей статьи, ее авторы ограничат анализ проблемы мотивации ранее приведенной фразой, однако при этом еще раз отметив большую роль фактора мотивации в достижении эффективности исследуемого вида деятельности — *предотвращения загрязнения окружающей среды при эксплуатации судов*. Данное понятие, в свою очередь, также требует разъяснений.

Судно является потенциальным источником загрязнения окружающей среды [2], [3]. Процесс загрязнения окружающей среды при эксплуатации судов должен регулироваться требованиями законодательства. Учитывая, что в данном случае речь идет о судах внутреннего плавания, то далее будут приняты во внимание требования национального законодательства [4] – [6].

Кроме того, необходимо обратить внимание на то, что загрязнение окружающей среды при эксплуатации судов может иметь разный характер. Необходимо различать такие виды загрязнения, как *эксплуатационное* и *аварийное*. Данные виды загрязнения имеют разную природу и причины возникновения [7], [8]. Поэтому каждое из них нужно рассматривать отдельно.

Эксплуатационное загрязнение — это загрязнение, которое неизбежно сопровождает процесс нормальной эксплуатации судов. Как правило, образование загрязненной субстанции (сточной и подсланевой воды или мусора) характеризуется равномерностью или, хотя бы, как минимум — известной интенсивностью образования указанных судовых загрязнений. Это означает главное — возможность регулирования процесса образования судовых загрязнений и тем самым предотвращения загрязнения окружающей природной среды при эксплуатации судов. Такое регулирование обеспечивается определенными требованиями, которые представлены в виде нормативно-правовой базы в области охраны окружающей среды при эксплуатации судов. В соответствии с этими требованиями в настоящее время регулируется возможное эксплуатационное загрязнение окружающей среды сточной водой и нефтесодержащей подсланевой, а также мусором. В свою очередь, для выполнения этих требований при организации природоохранной деятельности в области обеспечения экологической безопасности при судоходстве необходимо:

- наличие комплекса технических средств, в общем случае обеспечивающих сбор, временное хранение, транспортировку и переработку судовых загрязнений;
- обеспечение (мотивация) выполнения указанных выше требований.

Упомянутый комплекс технических средств может представлять собой:

- а) судовое природоохранное оборудование — судовые установки для очистки сточной и подсланевой воды, и инсинераторы;
- б) комплекс внесудовых технических средств, обеспечивающих сбор, транспортировку, временное хранение и переработку судовых загрязнений.

Эти два вида технических средств позволяют выполнить решение проблемы переработки судовых загрязнений, используя разные стратегии (*судовой* и *внесудовой* переработки загрязнений). Более подробно эти технические средства, как судовые, так и внесудовые, рассмотрены в работе [3], где также описаны вопросы организации внесудовой переработки судовых загрязнений. Понятно, что и та и другая стратегии требуют или оснащения судов судовым природоохранным оборудованием, или создания инфраструктуры внесудовых природоохранных технических средств.

Кроме того, существует еще один немаловажный вопрос, касающийся требований к степени очистки нефтесодержащей подсланевой или сточной воды. Этот параметр, являющийся основным с точки зрения природоохранных требований характеристикой, требует дополнительных разъяснений. Качество очищенной сточной или нефтесодержащей подсланевой воды при очистке в судовых установках контролируется по концентрации загрязняющих веществ и других параметров, характеризующих качество воды. Например, качество очищенной нефтесодержащей подсланевой воды контролируется по концентрации нефтепродуктов, а сточной воды — по концентрации взвешенных веществ, БПК₂₀, коли-индексу и концентрации хлора. Допустимые значения этих параметров представляют собой фиксированные значения для всех судов внутреннего плавания [4], [5].

При очистке на внесудовых очистных сооружениях контроль качества очищенной воды может осуществляться следующими двумя способами:

- 1) по концентрации загрязняющих веществ в очищенной воде (например, при очистке подсланевой воды на плавучих очистных станциях или на судах для комплексной переработки судовых отходов — СКПО);
- 2) по допустимому сбросу (интенсивности поступления) загрязняющих веществ в окружающую среду.

Второй способ регулирования поступления загрязнений в окружающую среду может означать появление более жестких требований по предельной концентрации загрязняющих веществ при очистке воды. Кроме того, непосредственно процедура расчета и согласования норм очистки во втором случае носит более сложный характер. Однако, несмотря на более сложную организа-

цию внесудовой переработки загрязнений, при эксплуатации судов внутреннего плавания, более целесообразным является использование стратегии внесудовой переработки загрязнений. Обоснование такого утверждения приводится в работе [3].

Выполнение указанных ранее требований в области предотвращения эксплуатационного загрязнения, в свою очередь, обеспечивается при выполнении следующих условий:

- наличие комплекса технических средств, обеспечивающих переработку судовых загрязнений при эксплуатации судов;
- знание ответственным лицом судовладельческого предприятия (в области обеспечения безопасности при судоходстве — СУБ) и командами судов содержания вышеупомянутых требований;
- формирование мотивации к действиям, обеспечивающим выполнение требований в области предотвращения загрязнения окружающей среды при судоходстве.

Обеспечение комплексом природоохранных технических средств осуществляется в результате организации и проведения судовладельческой компанией ряда организационных мероприятий, в результате которых формируется (возникает) возможность использования таких природоохранных технических средств. Такая возможность может создаваться двумя основными способами:

- созданием комплекса собственных природоохранных технических средств;
- использованием природоохранных технических средств, которые принадлежат другим предприятиям.

Знание ответственным лицом и членами команд судов содержания требований законодательства в области обеспечения экологической безопасности обеспечивается периодическим обучением командного состава на курсах повышения квалификации в учебных заведениях водного транспорта. Изучение содержания ранее указанных требований рядовым составом команд судов может осуществляться в процессе обучения, которое может быть организовано силами судовладельческой компании (например, отделом СУБ или самостоятельно под руководством командного состава с обязательным проведением проверки знаний, которая может быть организована отделом СУБ).

Способы формирования мотивации выполнения указанных требований могут и должны осуществляться с помощью проведения установленных мероприятий (способов) следующим образом:

- во время повышения квалификации командного состава;
- при проведении периодических специальных инструктажей, например, отделом СУБ, в области организации деятельности по обеспечению экологической безопасности при судоходстве;
- при помощи распространения информации о нарушениях в указанной области и последствиях таких нарушений;
- путем проверок судов, например, отделом СУБ, на предмет выполнения требований природоохранного законодательства, а также обязанностей членов команд в области обеспечения экологической безопасности;
- периодическим информированием (периодической отчетностью) отдела СУБ руководителей судовладельческой организации о состоянии экологической безопасности на судах;
- составлением плана работ в области организации обеспечения экологической безопасности при судоходстве;
- путем использования на судах средств наглядной информации в области обеспечения экологической безопасности.

Факторы, обеспечивающие предотвращение эксплуатационного загрязнения окружающей среды, могут составлять основу плана мероприятий судовладельческого предприятия в области СУБ.

Аварийное загрязнение может иметь место при возникновении аварийной ситуации во время эксплуатации судна [9], [10]. Аварийное загрязнение характеризуется неопределенностями следующего рода:

- пространственно-временной неопределенностью;
- неопределенностью с точки зрения возможного ущерба;
- неопределенностью причин возникновения аварийного загрязнения.

Таким образом, ранее изложенное позволяет выделить два основных направления снижения аварийного загрязнения при судоходстве:

- разработка комплекса организационных мероприятий и технических средств, направленных на предотвращение или снижение вероятности возникновения аварийного загрязнения (превентивная защита);

- разработка комплекса организационных мероприятий и технических средств, направленных на снижение (минимизацию) ущерба окружающей природной среде в случае возникновения аварийного загрязнения (активная защита).

Предотвращение или снижение вероятности возникновения аварийного загрязнения (превентивная защита) обеспечивается комплексом организационных мероприятий и технических средств.

К основным превентивным организационным мероприятиям относятся:

- анализ причин аварийного загрязнения, которое имело место в предшествующий период эксплуатации судов;

- разработка мероприятий, снижающих вероятность проявления этих причин в будущем или исключающих эти причины;

- разработка сценариев возможного развития событий, которые могут привести к аварийному загрязнению;

- прогнозирование аварийного загрязнения путем разработки возможных сценариев развития событий, которые могут привести к аварийному загрязнению окружающей среды;

- разработка рекомендаций по превентивным защитным мероприятиям на основе результатов ранее указанного прогнозирования аварийного загрязнения природной среды;

- разработка рекомендаций командам судов о предотвращении или снижении вероятности аварийного загрязнения;

- осуществление своевременной проверки состояния технических средств, неисправность которых может привести к аварийному загрязнению;

- проведение обучения персонала (команд судов);

- соблюдение правил безопасного судоходства.

Основными техническими средствами превентивной защиты являются:

- применение современных технических средств навигации, обеспечивающих снижение вероятности наступления аварийных ситуаций, которые могут привести к аварийному загрязнению окружающей природной среды;

- применение автоматических устройств, предотвращающих поступление загрязнений в аварийных ситуациях.

Снижение (минимизация) причинения ущерба окружающей природной среде в случае возникновения аварийного загрязнения (активная защита) может быть также обеспечена комплексом организационных мероприятий и технических средств. К основным организационным мероприятиям активной защиты относятся:

- разработка инструкций по действиям команды судов при возникновении аварийного загрязнения;

- организация и осуществление действий, прекращающих поступление загрязняющих веществ в окружающую природную среду при аварийном загрязнении;

- организация и осуществление действий, локализирующих распространение аварийного загрязнения;

- организация и осуществление действий, обеспечивающих ликвидацию аварийного загрязнения;

- организация и осуществление действий, обеспечивающих ликвидацию последствий аварийного загрязнения.

К основным техническим средствам активной защиты относятся:

- технические средства, обеспечивающие прекращение поступления загрязняющих веществ в окружающую среду;

– технические средства локализации распространения загрязнений в окружающей природной среде;

– технические средства, обеспечивающие ликвидацию аварийного загрязнения;

– технические средства, обеспечивающие ликвидацию последствий аварийного загрязнения.

Указанные организационные мероприятия и технические средства могут или должны быть учтены при составлении плана природоохранной деятельности, направленной на обеспечение экологической безопасности при судоходстве. Откуда следует, что в целом предотвращение аварийного загрязнения достигается при помощи использования следующих средств:

– применение технических средств превентивной защиты, предназначенных для предотвращения или снижения вероятности аварийного загрязнения;

– применение технических средств активной защиты, предназначенных для предотвращения или снижения ущерба при возникновении аварийного загрязнения;

– знание основ предотвращения аварийного загрязнения окружающей среды при эксплуатации судов;

– формирование мотивации к выполнению действий, направленных на предотвращение или снижение вероятности аварийного загрязнения.

Выводы

1. В настоящей статье сформированы цели природоохранной деятельности в области обеспечения экологической безопасности.

2. Целью природоохранной деятельности в области предотвращения эксплуатационного загрязнения является выполнение требований природоохранного законодательства, а в области предотвращения аварийного загрязнения — выполнение требований природоохранного законодательства, а также снижение вероятности аварийного загрязнения и снижение ущерба.

3. Предложено процесс загрязнения представлять в виде загрязнения эксплуатационного и аварийного, предотвращение которых требует определенного комплекса мероприятий и технических средств.

4. Для предотвращения эксплуатационного загрязнения предложено использовать судовые и внесудовые средства переработки судовых загрязнений, а предотвращение аварийного загрязнения окружающей среды следует обеспечивать путем применения мероприятий и средств превентивной и активной защиты.

5. Содержание настоящей статьи одновременно может быть использовано как алгоритм организации природоохранной деятельности компании в области обеспечения экологической безопасности при судоходстве.

6. Значительное внимание авторами статьи уделено мотивационному фактору обеспечения экологической безопасности при судоходстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон № 24-ФЗ от 7 марта 2001 г. Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации.

2. Решняк В. И. Охрана окружающей среды на водном транспорте / В. И. Решняк. — СПб.: СПбГУВК, 2010. — 105 с.

3. Решняк В. И. Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок / В. И. Решняк. — СПб.: СПбГУВК, 2011. — 207 с.

4. Наставление по предотвращению загрязнения внутренних водных путей при эксплуатации судов. — М., 2009.

5. СанПиН 2.5.2.703-98. Санитарные правила для судов внутреннего плавания. — 1998.

6. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей. — М.: Министерство природных ресурсов, 2008.

7. Решняк В. И. Регулирование эксплуатационного и аварийного загрязнения окружающей среды на объектах водного транспорта / В. И. Решняк, З. Юзвяк, А. Г. Щуров // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 85–90.

8. Решняк В. И. Стратегия предотвращения загрязнения внутренних водных путей и моря при эксплуатации судов / В. И. Решняк, В. Е. Леонов // Сб. трудов Третьей междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и инновационные технологии на транспорте». — Херсон, 2011. — С. 277–281.

9. Решняк В. И. Экологическая безопасность при перегрузке нефти и нефтепродуктов в портах / В. И. Решняк. — СПб.: СПбГУВК, 2007. — 237 с.

10. Решняк В. И. Методологические основы регулирования загрязнения окружающей среды при эксплуатации объектов водного транспорта / В. И. Решняк, З. Юзвяк, А. Г. Щуров // Сб. тр. Междунар. науч. конф. «Балтийский Морской форум». — Калининград: Изд-во БГАРФ, 2013. — С. 274–278.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF MANAGEMENT OF ECOLOGICAL SAFETY DURING SHIPPING

In this paper we analyze the problem of environmental safety during navigation, which must be provided in accordance with the requirements of modern legislation in the field of navigation and environmental protection. Ensuring environmental security is a certain activity that requires organization and management. Organization this activity involves the development and implementation of complex actions, as well as the use of technical means. In addition, the effective implementation of those activities requires the management of this activity and is provided by using management systems. The authors of this article proposed an algorithm for developing a management system, including working on a set of key organizational measures and recommendations for selection of hardware components to ensure environmental security taking into account the specific conditions of navigation and the type of contamination, which the authors proposed to consider the operational and accidental pollution. Given this separation, the authors also proposed the formulation of goal of management of environmental safety. Considerable attention the authors paid to the motivational factor of ensuring environmental safety shipping

Keywords: ecological safety, navigation, accidental and operational pollution, management.

REFERENCES

1. Russian Federation. Federal law № 24-FZ. 7 March 2001. Kodeks vnutrennego vodnogo transporta Rossijskoj Federacii.
2. Reshnyak, V. I. *Ohrana okruzhajushhej sredy na vodnom transporte*. SPb.: SPbGUVK, 2010.
3. Reshnyak, V. I. *Predotvrashhenie zagryaznenija vodoemov neftesoderzhashhej podslanevoj vodoj pri jekspluatacii sudov i sudovyh jenergeticheskikh ustanovok*. SPb.: SPbGUVK, 2011.
4. *Nastavlenie po predotvrashheniju zagryaznenija vnutrennih vodnyh putej pri jekspluatacii sudov*. M., 2009.
5. Russian Federation. Sanitary Rules and Standards. SanPiN 2.5.2.703-98. Sanitarnye pravila dlja sudov vnutrennego plavanija. 1998.
6. Ministry of Natural Resources of The Russian Federation. *Metodika razrabotki normativov dopustimyh sbrosov veshhestv i mikroorganizmov v vodnye obekty dlja vodopolzovatelej*. 2008.
7. Reshnyak, V. I., Z. Juzvyak, and A. G. Shhurov. “Regulation of operational and accidental pollution of the environment at the water transport.” *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2013): 85–90.
8. Reshnyak, V. I., and V. E. Leonov. “Strategija predotvrashhenija zagryaznenija vnutrennih vodnyh putej i morja pri jekspluatacii sudov.” *Sb. trudov Tre'tej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Sovremennye informacionnye i innovacionnye tehnologii na transporte»*. Herson, 2011: 277–281.
9. Reshnyak, V. I. *Jekologicheskaja bezopasnost pri peregruzke nefi i nefteproduktov v portah*. SPb.: SPbGUVK, 2007.
10. Reshnyak, V. I., Z. Juzvyak, and A. G. Shhurov. “Metodologicheskie osnovy regulirovanija zagryaznenija okruzhajushej sredy pri expluatacii obiekto v odnogo transporta” *Sb. trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii “Baltijskij Morskij forum”*. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2013: 274–278.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Решняк Валерий Иванович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
RV53@mail.ru, kaf_chemistry@gumrf.ru
Батяев Алексей Викторович — аспирант
Научный руководитель:
Решняк Валерий Иванович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
alexey_batjaev@mail.ru,
Решняк Ксения Валерьевна —
ведущий специалист.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
mili1984@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reshnyak Valery Ivanovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
RV53@mail.ru, kaf_chemistry@gumrf.ru
Batjaev Aleksej Viktorovich — postgraduate.
Supervisor:
Reshnyak Valery Ivanovich
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
alexey_batjaev@mail.ru
Reshnyak Ksenia Valerjevna —
Leading Specialist.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
mili1984@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2016 г.

УДК 656.613: 519.86

**И. В. Зуб,
Ю. Е. Ежов**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ТЕРМИНАЛА
ВЛОЖЕННЫМИ СЕТЯМИ ПЕТРИ**

В статье рассмотрена имитационная модель функционирования транспортным терминалом, разработанная посредством аппарата вложенных сетей Петри. Предпосылками к использованию аппарата вложенных сетей Петри являются наличие случайной и детерминированной составляющих в технологии обслуживания транспортных средств (в зависимости от их прибытия), возможность представления функционирования взаимодействующих подсистем терминала в виде совокупностей параллельных, технологически однородных процессов, ситуационность управления погрузочно-разгрузочными работами, связанная со стохастичностью входного потока заявок и с текущим состоянием парка перегрузочной техники. В ходе моделирования выявлены конфликтные ситуации, найдены пути их решения и определены оптимизационные параметры. Полученными оптимизационными параметрами являются время восстановления работоспособности и производительность парка перегрузочной техники. Для оптимизации первого параметра (время восстановления работоспособности) предусмотрены технические мероприятия по поддержанию перегрузочной техники в работоспособном состоянии. Второй оптимизационный параметр взаимосвязан с первым, так как повышение работоспособности парка перегрузочной техники зависит от работоспособности каждой машины в отдельности. Повышение производительности парка перегрузочной техники и его поддержание в работоспособном состоянии позволяют оптимизировать резерв за счёт его сокращения.

Ключевые слова: автоматизация управления, перегрузочная техника, транспортный терминал, техническая эксплуатация.



ПОВЫШЕНИЕ эффективности функционирования транспортного терминала невозможно без автоматизации и совершенствования системы управления. Для перехода на автоматизированную систему управления транспортным объектом предварительно разрабатывается имитационная модель. Задачами моделирования являются: построение функционирования

взаимодействия подсистем терминала, определение их функционального взаимодействия; определение возникающих в процессе функционирования конфликтных ситуаций.

Транспортный терминал (ТТ) является самостоятельным звеном логистической цепи. Его основными производственными задачами являются: оказание погрузочно-разгрузочной услуги (ПРУ) для грузовладельцев и транспортных компаний, являющихся перевозчиками груза. В условиях конкуренции, качество предоставляемой ПРУ оказывает влияние на обеспечение конкурентоспособности терминала и его экономическую составляющую. Основными статьями получения финансовых средств ТТ являются ПРУ и услуги по хранению груза. Оказание качественной ПРУ, которая оценивается двумя критериями: скорость обработки транспортных средств и сохранность груза при среднерыночной стоимости предоставляемой услуги, позволяет терминальному оператору не только сохранить, но и увеличить грузопоток. В работе [1] авторы предложили модель обеспечения качества ПРУ. В ходе моделирования были определены ресурсы, обеспечивающие скорость обработки транспортных средств. Такими ресурсами являются страховой запас запасных частей и резерв перегрузочной техники (ПТ). Наличие резерва ПТ позволяет обеспечить расчётную пропускную способность терминала.

В работе [2] пропускная способность (ПС) определяется как функция технологических и экономических параметров и внешних ограничений:

$$ПС = f(Q_{\text{вх}}, П_{\text{ПТ}}, ПС_{\text{ПК}}, V_{\text{ТТ}}, t_{\text{хр}}, P_{\text{ТС}}), \quad (1)$$

где $Q_{\text{вх}}$ — входной грузопоток; $П_{\text{ПТ}}$ — производительность парка ПТ; $ПС_{\text{ПК}}$ — пропускная способность подъездных коммуникаций; $V_{\text{ТТ}}$ — емкость ТТ (в м³, т, TEU (транспортная условная единица, эквивалент 20-футового контейнера)), $V_{\text{ТТ}} = (F_{\text{ТТ}} h) f_{\text{гр}}$, где $F_{\text{ТТ}}$ — полезная площадь ТТ, т. е. площадь занятая под хранение груза, данный параметр зависит от типа ПТ и геометрических размеров ТТ; h — количество ярусов складирования груза (данный параметр зависит от типа ПТ); $f_{\text{гр}}$ — площадь, занимаемая одной единицей груза; $t_{\text{хр}}$ — время хранения груза, $t_{\text{хр}} = f(t_{\text{хр,дог}}, P_{\text{ТС}})$; $P_{\text{ППР}}$ — ритмичность погрузочно-разгрузочных работ (ППР); $P_{\text{ТС}}$ — ритмичность подачи ТС.

Производительность парка перегрузочной техники ($П_{\text{ПТ}}$) — это фактор, который может выступать как объект оптимизации работы ТТ и зависит от технического состояния каждой отдельно взятой единицы техники. Повышение коэффициента технической готовности ПТ повышает эффективность функционирования терминала, которая невозможна без автоматизации и совершенствования системы управления, без автоматизации составляющих ее подсистем и взаимосвязей между ними. Переход на автоматизированное управление терминалом позволит существенно повысить производительность труда, снизить себестоимость грузовых операций и сократить расходы на содержание ПТ.

Для исследования системы управления ТТ создаётся имитационная модель, построенная посредством аппарата сети Петри, что позволяет провести анализ поведения системы при её функционировании. Формализм сетей Петри даёт возможность применять аналитические методы как для анализа исполнения, так и для верификации логических свойств исследуемых процессов, а также требует точных определений, исключая неопределенность и противоречия [3]. Последовательность событий сети образует моделируемый процесс, отражающий его структурно-логическую связь.

Сети Петри позволяют выстраивать иерархическую систему управления процессами, при этом каждый уровень системы может иметь свою сеть, работающую параллельно, отражая во вложенных сетях внутренние процессы рассматриваемой позиции. Анализ систем посредством аппарата сетей Петри является перспективным направлением, так как на основании созданных моделей возможно написание специализированных программ для автоматизированной системы управления терминалом.

Предпосылками к использованию аппарата сетей Петри являются наличие случайной и детерминированной составляющих в технологии обслуживания транспортных средств (ТС) на ТТ, возможность представления технологии обслуживания ПТР в виде совокупности параллельных,

технологически однородных процессов, ситуационность управления ТТ, связанная со стохастичностью входного потока заявок и с текущим состоянием парка ПТ.

Ряд специфических особенностей терминала делает целесообразным использование сетей Петри для его описания и анализа [4]:

- в структуре ТТ выделяются взаимосвязанные подсистемы со сложными структурными и функциональными отношениями, включая обратные связи;
- изолированная оптимизация отдельных подсистем, не обеспечивая системную оптимизацию, может приводить к конфликтным ситуациям;
- стохастичность транспортных потоков делает процесс обслуживания заявок вероятностным.

Работа ТТ обеспечивается разнородными ресурсами: человеческими, техническими, информационными [5]. Взаимодействие данных ресурсов обеспечивают работу ТТ и качество погрузочно-разгрузочной услуги [1]. Эти ресурсы при моделировании помещаются в позиции сети в виде маркеров (фишек) [6], [7], причем фишкам придается вес (размерность) в соответствии с необходимыми для запуска перехода ресурсами.

Рассмотрим структурно-логическую схему функционирования ТТ в виде представленной сети Петри (рис. 1). Функционирование ТТ представляется в виде последовательности событий, основанных на причинно-следственных связях. Задачей данной модели является идентификация конфликтных ситуаций. Под конфликтной ситуацией понимается такое положение в сети Петри, когда позиция имеет выходы на два перехода и более. В зависимости от выбора может сработать только один переход. В позиции s_1 находится фишка, которая имеет некую размерность n в зависимости от количества поступивших заявок, $n = n_1, n_2, \dots, n_i$ [6], [7].

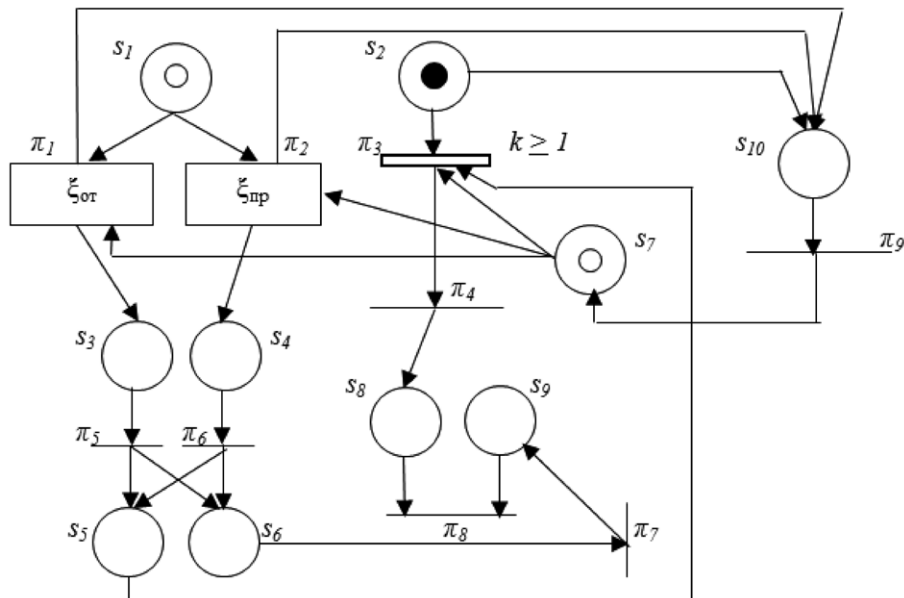


Рис. 1. Имитационная модель транспортного терминала:

- s_1 — заявка на обслуживание ТС; s_2 — ТС готово к грузовым операциям;
- s_3 — грузовая партия к отгрузке готова; s_4 — место для принятия грузовой партии готово;
- s_5 — задание на выполнение ПРР; s_6 — запрос на оформление документов; s_7 — готовность ПТ к ПРР;
- s_8 — ТС готово к убытию; s_9 — документы получены; s_{10} — заявка на ПТ;
- π_1 — подготовка грузовой партии к отгрузке; π_2 — подготовка места для принятия грузовой партии;
- π_3 — обслуживание ТС; π_4 — ПРР завершено; π_5, π_6 — сообщение диспетчеру о готовности начать ПРР;
- π_7 — оформление документов; π_8 — убытие ТС с терминала; π_9 — подача заявки на ПТ

Позиция s_7 является конфликтной, конфликт решается посредством ситуационного управления [8]. Позиция s_1 имеет свою сеть (рис. 2), которая работает следующим образом. При поступле-

нии заявки (позиция s_1^2) срабатывает переход π_1^2 , в зависимости от поступившей заявки фишка поступит в позицию s_2^2 или s_3^2 , далее фишка, попадая в переходы π_2^2 или π_3^2 , вызовет срабатывание перехода. В зависимости от поступившей заявки (приёмка или отправка груза) запускается один из переходов: π_1 или π_2 . Переход π_1 имеет метку $\xi_{от}$, переход π_2 — метку $\xi_{пр}$ во встроеной сети позиции s_1 (см. рис. 2). Переходы π_2^2 и π_3^2 имеют соответствующие метки $\xi'_{пр}$ и $\xi'_{от}$. Эти метки являются взаимодополняющими и служат для синхронизации переходов. Два перехода помеченные такими метками могут сработать одновременно [9]. При попадании фишки в переход π_2^2 сработает переход π_2 , при срабатывании перехода π_3^2 сработает переход π_1 . Из позиции s_1 (заявка на обслуживание), при размерности фишки $n \geq 2$, процессы (подготовка грузовой партии, подготовка места под выгрузку, оформление документов) будут идти параллельно, при условии, что в позиции s_7 существует достаточная размерность фишки (наличие работоспособной ПТ) для запуска переходов π_1, π_2, π_3 .

В позиция s_2 фишка имеет размерность k , которая завит от количества ТС, прибывших на терминал. Переход π_3 имеет охрану $k \geq 1$, согласно терминологии, используемой в источнике [9], т. е. переход не будет запущен, если отсутствуют ТС. Переход π_3 будет запущен, если в него поступят фишки из позиций s_2, s_5, s_7 . Обслуживание ТС начнется только после того как ТС будет готово к проведению ПРР, получено задание на выполнение ПРР, а также требуемая для поведения ПРР техника будет в работоспособном техническом состоянии и в необходимом количестве. После срабатывания перехода π_4 фишка поступит в позицию s_8 . Переход π_8 является стоком и будет запущен после того как в него поступят фишки с позиций s_8 и s_9 (ТС убудет с терминала только при условии, что ПРР завершено, документы готовы и переданы на ТС). Как видно, в сети, представленной на рис. 1, от позиции s_7 зависит запуск трёх переходов: π_1, π_2, π_3 , что делает данную позицию «ключевой». Данная ситуация является конфликтной. В данном конфликте сеть Петри показывает потенциальные возможности выбора [10]. Этот конфликт разрешается посредством ситуационного управления технической эксплуатацией парка ПТ (вложенная сеть позиции s_7 (рис. 3)).

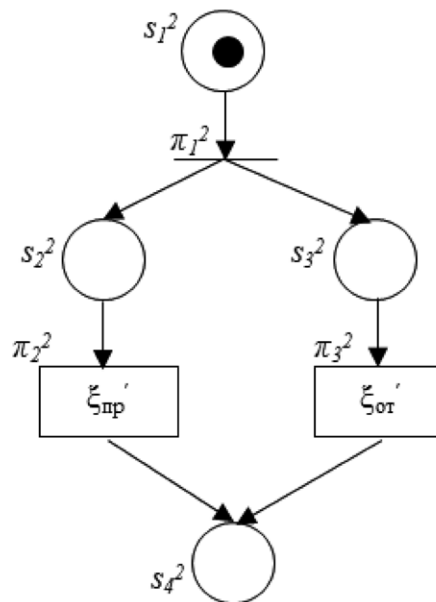


Рис. 2. Вложенная сеть Петри позиции s_1 : s_1^2 — поступление заявки на выполнение ПРР; s_2^2 — заявка на прием груза; s_3^2 — заявка на выдачу груза; s_4^2 — заявка на выдачу ПТ; π_1^2 — идентификация заявки; π_2^2 — регистрация заявки на приёмку груза; π_3^2 — регистрация заявки на отправку груза

Рассмотрим сеть, приведенную на рис. 3. Позиция p_1^3 имеет фишку, разметка которой равна количеству заявок на ПТ. Позиция p_2^3 показывает техническое состояние парка ПТ, данная позиция имеет вложенную сеть (рис. 4). Позиция p_1^4 имеет фишку, размерность которой равна количеству ПТ, данная позиция является конфликтной. В зависимости от условий эксплуатации

может произойти повреждение, отказ, инцидент или авария ПТ. При повреждении производится осмотр ПТ, которая остается в работоспособном состоянии. При отказе ПТ диагностируют. По результатам диагностики ПТ может оставаться в работоспособном состоянии или переходить в неработоспособное состояние, в этом случае срабатывает переход π_7^4 имеющий метку δ'' (в этом случае ПТ будет выведена на внеплановый ремонт). При инциденте ПТ переходит в неработоспособное состояние и выводится из эксплуатации. При аварии ПТ в ремонт не выводится, а подлежит утилизации, так как в Федеральном законе № 116 ФЗ [11] под аварией понимается разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте. В сети позиции p_2^3 (см. рис. 4) переход π_9^4 имеет метку α , а переход π_3^3 — метку α' . Эти два перехода срабатывают одновременно. Фишка из позиции p_2^3 запустит переход π_3^3 (при переходе в неработоспособное состояние ПТ будет выведена на ремонт).

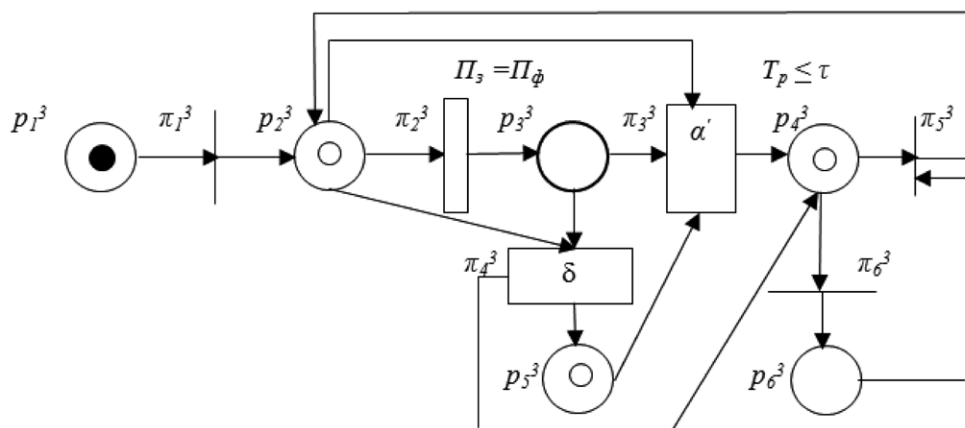


Рис. 3. Вложенная сеть позиции s_7 : p_1^3 — заявка на ПТ; p_2^3 — ПТ готова к эксплуатации; p_3^3 — наработка ПТ на техническое обслуживание и ремонт; p_4^3 — запрос на резервный ПТ; p_5^3 — ПТ выведена на внеплановый ремонт; p_6^3 — резерв ПТ; π_1^3 — регистрация заявки; π_2^3 — эксплуатация ПТ; π_3^3 — вывод ПТ на техническое обслуживание и ремонт; π_4^3 — вывод ПТ на внеплановый ремонт; π_5^3 — ввод ПТ в эксплуатацию; π_6^3 — вывод ПТ в резерв

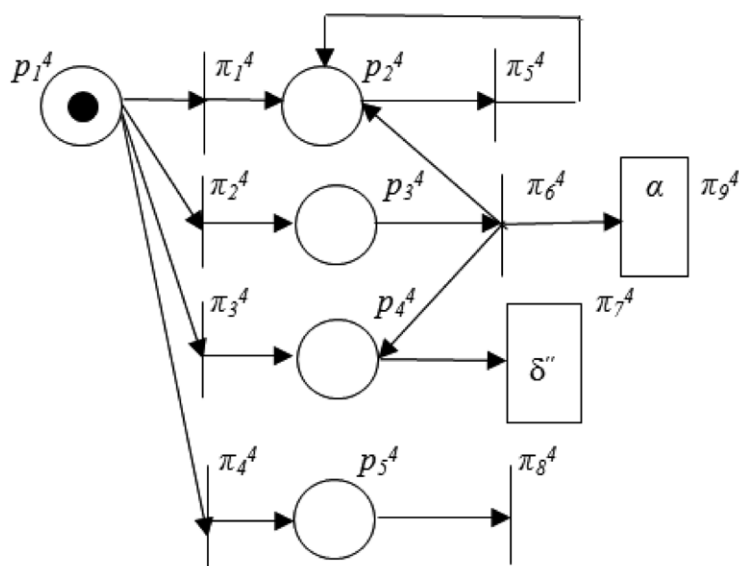


Рис. 4. Вложенная сеть позиции p_2^3 :
 p_1^4 — исправное состояние ПТ; p_2^4 — работоспособное состояние; p_3^4 — ПТ выведен на диагностику; p_4^4 — ПТ в неработоспособном состоянии; p_5^4 — ПТ в аварийном состоянии; π_1^4 — повреждение ПТ; π_2^4 — отказ ПТ; π_3^4 — инцидент с ПТ; π_4^4 — авария с ПТ; π_5^4 — осмотр ПТ; π_6^4 — диагностика ПТ; π_7^4 — вывод ПТ на внеплановый ремонт; π_8^4 — ПТ передана на утилизацию; π_9^4 — вывод ПТ на ремонт

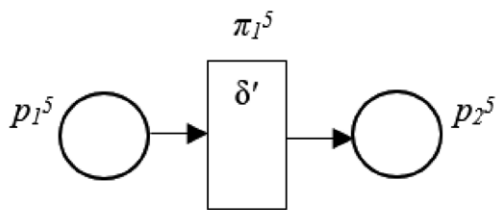


Рис. 5. Вложенная сеть позиции p_5^3 :
 p_1^5 — контролируемые параметры в норме;
 p_2^5 — контролируемые параметры имеют предельное значение;
 π_1^5 — нарушение правил технической эксплуатации

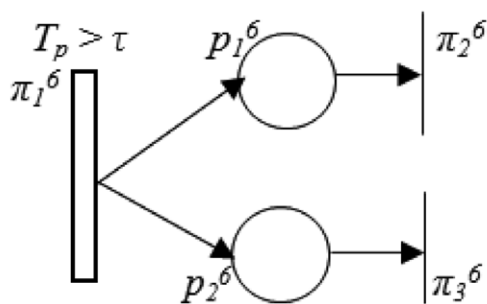


Рис. 6. Вложенная сеть позиции p_4^3 :
 p_1^6 — заявки не выполнены;
 p_2^6 — заявки выполнены;
 π_1^6 — время ремонта превысило заданное;
 π_2^6 — вывод ПТ в резерв;
 π_3^6 — ввод резервной ПТ

Переход π_2^3 имеет охрану $\Pi_3 = \Pi_\phi$ (заданные параметры соответствуют фактическим, т. е. ПТ эксплуатируется в штатном режиме). В позиции p_5^3 имеется встроенная сеть (рис. 5). Переход π_2^3 имеет метку δ , переход π_1^5 — метку δ' , при нарушении правил технической эксплуатации сработают идентичные метки δ, δ', δ' и ПТ будет выведена на внеплановый ремонт.

Позиция p_4^3 (рис. 6) имеет встроенную сеть — при выполнении заявок ПТ выводится в резерв, при невыполнении заявок вводится в эксплуатацию резервная техника.

Сети Петри, являясь асинхронным средством моделирования только причинно-следственных связей в объекте, не могут напрямую использоваться для целей имитационного моделирования ТТ. В частности, отсутствие временных параметров и средств для фиксации порядка поступления фишек в позиции не позволяет установить порядок срабатывания переходов. Поэтому асинхронную сеть Петри, отражающую только логику функционирования сети Петри, следует совместить с временными характеристиками всего спектра реализуемых операций. Для этого в алгоритме имитационного моделирования каждому переходу π_j , который обозначает отдельную производственную операцию, приписывается время его реализации τ_j . Значение τ_j может в ходе имитации задаваться двояко: либо как среднее выборочное по совокупности статистических данных, либо путем «разыгрывания» соответствующей эмпирической функции распределения.

В переходе π_3^3 при введении охраны, выраженной неравенством $T_p \leq \tau$, которое означает, что если в течение времени τ не будет восстановлена работоспособность ПТ, то сработает переход и в эксплуатацию будет введена резервная техника. В свою очередь, переменную τ можно рассматривать как параметр оптимизации работы ТТ. При оптимальных значениях τ минимизируется резерв ПТ. При превышении времени τ запрашивается резервная ПТ для обеспечения заявок на ПТР.

Таким образом, посредством аппарата вложенных сетей Петри была рассмотрена имитационная модель ТТ, что позволило выстроить иерархическую сеть, отображающую функционирование терминала, и проанализировать полученные функционально-логические связи между позициями сети. При анализе модели были выявлены проблемы, возникающие при работе ТТ, а также их влияние на функционирование ТТ.

Выводы

1. В ходе моделирования было выполнено определение конфликтных ситуаций (позиции s_1, s_7 на рис. 1, позиция p_4^3 на рис. 3, позиция p_1^4 на рис. 4). Все позиции, в которых возникают конфликтные ситуации, имеют свои вложенные сети, которые показывают разрешение (управление) конфликтной ситуацией;
2. Определен оптимизирующий параметр τ (время восстановления работоспособности ПТ).
3. В работе рассмотрены технические методы решения конфликтных ситуаций. Для полного решения возникающих в процессе функционирования ТТ задач необходимо использовать и организационные методы решения.

4. Задачей терминального оператора является не только формирование парка ПТ, но и поддержание технического состояния парка на должном уровне, повышение продолжительности времени безотказной эксплуатации ПТ, что обеспечивает работоспособность терминала. Данная задача решается в разрезе управления технической эксплуатацией парка ПТ. Соблюдение графиков технического обслуживания и ремонта, диагностика ПТ при проведении технического обслуживания позволяют увеличить коэффициент технической готовности и снизить простои техники во время проведения внеплановых ремонтов. При проведении регламентных (плановых) работ терминальный оператор придерживается одной из стратегий ремонта, которые определяются технической политикой терминала: первая стратегия — это проведение регламентных ремонтов в соответствии с наработкой; вторая стратегия — проведение ремонтов в соответствии с техническим состоянием ПТ. Обе стратегии имеют «сильные» и «слабые» стороны. В первом случае увеличиваются финансовые расходы, но уменьшается вероятность выхода из эксплуатации ПТ во время проведения внеплановых ремонтов, во втором случае уменьшаются финансовые затраты, но увеличивается вероятность отказа ПТ во время эксплуатации. Вывод ПТ на внеплановые ремонты уменьшает ПС терминала и снижает экономические показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зуб И. В.* Контейнерный терминал как объект управления качеством транспортно-технологических операций / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 35–41.
2. *Зуб И. В.* Пропускная способность контейнерного терминала как функция технологии управления / И. В. Зуб // Высокие технологии, фундаментальные исследования, образование: сб. тр. Седьмой междунар. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 28 – 30.04.2009. Т. 16 (2). — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. — С. 176–181.
3. *Вил ван дер Ааласт.* Управление потоками работ: модели и системы / Вил ван дер Ааласт, Кейс ван Хей; пер. с англ. В. А. Башкина, И. А. Ломазовой. — М.: Физматлит, 2007. — 316 с.
4. *Лескин А. А.* Сети Петри в моделировании и управлении / А. А. Лескин, П. А. Мальцев, А. М. Спиридонов. — Л.: Наука, 1989. — 133 с.
5. *Зуб И. В.* Информационные технологии повышения эффективности управления контейнерным терминалом / И. В. Зуб // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3. — С. 6–9.
6. *Котов В. Е.* Сети Петри / В. Е. Котов. — М.: Наука, 1984. — 160 с.
7. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон / под общ. ред. д-ра техн. наук В. А. Горбатого; пер. с англ. М. В. Горбатовой, В. Л. Торхова, В. Н. Четверикова. — М.: Мир, 1984. — 264 с.
8. *Голиков В. К.* Сети Петри в ситуационном управлении и имитационном моделировании дискретных технологических систем / В. К. Голиков, К. Н. Матусов, В. В. Сысоев. — М.: ИПРЖР, 2002. — 227 с.
9. *Ломазова И. А.* Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределённых систем с объективной структурой / И. А. Ломазова. — М.: Научный мир, 2004. — 208 с.
10. *Юдицкий С. А.* Операционно-целевое моделирование динамики развития организационных систем средствами сетей Петри / С. А. Юдицкий // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 114–123.
11. Федеральный закон № 116 ФЗ. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: [принят Гос. Думой 20.06.1997 г.].

MODELING OF FUNCTIONING OF THE TRANSPORT TERMINAL NESTED PETRI NETS

The effective functioning of the terminal is impossible without the automation and improvement of the management system. To transition to the automated control system of transport facility, previously developed simulation model. The objectives of the simulation are: building functioning interaction of subsystems of the terminal, determining their functional interaction; determination regarding the functioning of conflict situations. The article describes a simulation model of the operation of the transport terminal, developed a nested Petri nets. Prerequisites

to use nested Petri nets are the presence of random and deterministic components in the technology of maintenance of vehicles (depending on their arrival), the possibility of presenting the functioning of the interacting subsystems of the terminal in the form of sets of parallel, technologically homogeneous processes, situational management of loading and unloading activity associated with the stochasticity of input flow of requests and with the current state of the fleet of handling equipment. During the simulation conflict situations were identified, their solutions were found, optimizing parameters were defined. The obtained optimization parameters are the restoration time and capacity of handling equipment fleet. For optimization of the first parameter (time of restoration) provided technical measures for maintenance of handling equipment in working condition. The second optimization option is interrelated with the first, because increase efficiency of handling equipment fleet depends on the efficiency of each machine separately. Improved performance of handling equipment and its maintenance in operational condition will help optimize the reserve at the expense of reducing it.

Keywords: automation, handling equipment, transport terminal, maintenance.

REFERENCES

1. Zub, I. V., and E. Y. Ezhov. "The container terminal as an object of management of the quality of transport-technological operations." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 3(19) (2013): 35–41.
2. Zub, I. V. "Propusknaja sposobnost kontejnernogo terminala kak funkciya tehnologii upravlenija." *Vysokie tehnologii, fundamentalnye issledovaniya, obrazovanie: sbornik trudov Sedmoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Issledovanie, razrabotka i primenenie vysokih tehnologij v promyshlennosti»*. 28-30.04.2009, Sankt-Peterburg, Rossiya. Vol. 16 (2). SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2009: 176–181.
3. Vil van der Aalast, and Kejs van Hej. *Upravlenie potokami robot: modeli i sistemy*. M.: Fizmatlit, 2007.
4. Leskin, A. A., P. A. Malcev, and A. M. Spiridonov. *Seti Petri v modelirovanii i upravlenii*. L.: Nauka, 1989.
5. Zub, I. V. "Informacionnye tehnologii povysheniya jeffektivnosti upravlenija kontejnernym terminalom." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2009): 6–9.
6. Kotov, V. E. *Seti Petri*. M.: Nauka, 1984.
7. Piterson, Dzh. *Teorija setej Petri i modelirovanie sistem*. M.: Mir, 1984.
8. Golikov, V. K., K. N. Matusov, and V. V. Sysoev. *Seti Petri v situacionnom upravlenii i imitacionnom modelirovanii diskretnyh tehnologicheskikh sistem*. M.: IPRZhR, 2002.
9. Lomazova, I. A. *Vlozhennye seti Petri: modelirovanie i analiz raspredeljonnyh sistem s obektivnoj strukturoj*. M.: Nauchnyj mir, 2004.
10. Yuditskii, S. A. "Operational-objective modeling of dynamics of organizational systems development via Petri nets." *Automation and Remote Control* 69.1 (2008): 105–113.
11. Russian Federation. Federal law № 116 FZ. 20 Jun. 1997. O promyshlennoj bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh obektov.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зуб Игорь Васильевич —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова».
zubiv@mail.ru
Ежов Юрий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова».
EzhovYE@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zub Igor Vasilevich — PhD.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
zubiv@mail.ru
Ezhov Yyri Evgenevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
EzhovYE@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 22 января 2016 г.

УДК 612.017.2:613.6:656.61

**Р. В. Кубасов,
В. В. Лупачев,
М. В. Попов**

УСЛОВИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖА НА БОРТУ МОРСКОГО СУДНА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

В обзоре литературы охарактеризованы условия морского труда, в которых находятся работники, выполняющие свои профессиональные обязанности в процессе рейса. Перечислены факторы, оказывающие негативное воздействие на состояние здоровья членов экипажа судна. Среди них наибольшую степень влияния оказывают физические (шум, вибрация, механические удары, разночастотные, ионизирующие излучения), химические, климатогеографические, социально-психологические. Сделано заключение об экстремальности условий труда плавсостава, которые вызывают напряжение адаптационных систем, нарушение регуляторных функций, приводящие, в конечном итоге, к ухудшению состояния здоровья и снижению трудоспособности. Отмечено, что в рамках системы медицинского обеспечения работников водного транспорта необходим комплексный учет неблагоприятных факторов профессиональной среды с целью создания качественных и безопасных условий труда.

Ключевые слова: морской труд, неблагоприятные профессиональные факторы, здоровье, адаптация.

С ПЕЦИФИКА морского труда обуславливает необходимость длительного пребывания моряков на борту судна [1]. Все факторы, которые можно объединить в интегральное понятие «судовая среда», в течение продолжительного времени (на протяжении всего периода их пребывания на судне, которое является ограниченным объектом) оказывают воздействие на организм моряков. Такая обстановка вызывает функциональные изменения в организме. Постоянное пребывание в этих условиях может привести к развитию патологических состояний [2] – [4].

Как для транспортных, так и для промысловых судов основу комплекса неблагоприятных внешних производственных факторов составляют шум, вибрация, широкополосные электромагнитные излучения, а также наличие вредных веществ в воздухе помещений. Кроме того, процесс рейса сопровождается качкой, гидродинамическими ударами и другими внешними воздействиями [5]. Причем подверженность воздействию личного состава судна в отношении одних факторов происходит постоянно (микроклимат помещений, условия размещения и т. п.), а других (температурные и электромагнитные излучения, наличие вредных веществ в воздухе) — периодически [6].

Следует отметить, что к большинству факторов судовой среды в организме нет хорошо развитых адаптационных механизмов, т. е. их воздействие часто и быстро приводит к потере трудоспособности и нарушению состояния здоровья моряков [7]. Одним из них является шум, возникающий при работе технических средств на судне [8], источниками которого являются практически все подвижные части механизмов и машин, в процессе эксплуатации вызывающие вибрацию или колебания воздуха. С целью обеспечения большой скорости судна широко внедряются высокооборотные судовые двигатели. Однако их эксплуатация одновременно ухудшает обитаемость. Шум, создаваемый установками на судне, обладает значительной высокочастотной интенсивностью, оказывающей на организм человека крайне негативное воздействие [9], [10]. Так, при замерах шума в судовых помещениях показано, что их уровни не удовлетворяют гигиеническим нормам, превышая норму более чем на 20 – 25 дБ [11], [12]. Интенсивное воздействие шума изменяет функциональное состояние центральной нервной системы, что проявляется в ослаблении внимания, замедлении психических реакций, утомлении, нарушении точности движений. В отдельных случаях фиксируются изменения гормональной регуляции [13].

Одним из наиболее характерных проявлений действия шума на организм является снижение порога слуховой чувствительности, вплоть до необратимых изменений состояния слухового анализатора в случае длительного сильного и постоянного его воздействия [14], [15]. Помимо влияния шума на сенсорные органы, известно его воздействие на сердечно-сосудистую систему, проявляющееся в виде колебаний артериального давления (сосудистые спазмы), аритмии сердца, изменений частоты и наполнения пульса [16] – [18]. Помимо шума неблагоприятное влияние на функциональное состояние и работоспособность моряков оказывает вибрация. На судах вибрация возникает под действием возмущающих сил во время вращения гребных винтов и работе других различных механизмов, достигая, в ряде случаев, существенных значений. Так, на судах транспортного флота уровень вибрации зачастую превышает допустимые нормы на 20 – 30 % [19]. Одними из наиболее уязвимых к вибрации органов у плавсостава являются органы пищеварения [20], [21].

Среди физических факторов, усложняющих среду обитания моряков, особое место занимают широкополосные электромагнитные излучения [22]. Оснащенность современных судов радиоэлектронными средствами различного предназначения очень велика. Это могут быть работающие в диапазонах ультравысоких и сверхвысоких частот радиопередающие устройства, средства спутниковой связи, радиолокационные станции. Специалисты, работающие с радиоэлектронными устройствами, фактически выполняют свои производственные функции в зонах, образованных своеобразными «антенными полями». Экспериментально установлено, что биологический эффект электромагнитных излучений приводит к дизадаптации организма, вплоть до нарушения гомеостаза [23].

Характеризуя условия труда и жизнедеятельности плавсостава, необходимо уделять большое внимание химическим факторам, среди которых не последнюю роль играет газовый состав воздушной среды [24]. В рабочих и жилых помещениях современных судов может определяться до нескольких десятков химически вредных веществ. В процессе эксплуатации технических средств вырабатываются выхлопные газы, пары топлива и масла поступают в воздух помещений [25], [26]. При этом состояние воздуха и, соответственно, микроклимат во многом зависят от материалов, использованных для отделки помещений. Часто, в качестве отделочных материалов применяются полимерные соединения: акрилонитрин, полиуретан, фенолформальдегид, поливинилхлорид, фторопласт, эпоксидные смолы и т. д. [27]. Под воздействием на них производственных и внешних факторов (высокая температура, ионизирующее излучение, солнечный свет) возможно выделение токсичных веществ [28].

Следует отметить, что на специализированных судах (транспортные газовозы, химовозы, нефтеналивные плавучие средства) существует высокая аварийная химическая опасность [29] – [31]. Организм работающего персонала на этих транспортных средствах подвергается воздействию перевозимых им продуктов [32]. Исследования показали, что более чем у 2/3 моряков тралового флота выявляются нарушения антитоксической функции печени, изменения со стороны центральной нервной, вегетативной, сердечно-сосудистой, дыхательной и пищеварительной систем. В то же время среди экипажей сухогрузных судов и контейнеровозов эти показатели оказались существенно ниже [33] – [35]. Попадающие в воздух токсичные вещества содержат функционально активные химические группы, которые отрицательно воздействуют на организм моряков, что проявляется в виде аллергических реакций, поражений кожи и слизистых, отравлений, различных новообразований [36], [37]. Таким образом, химический фактор является обязательным к учету для оценки состояния здоровья экипажа транспортных и рыбопромысловых судов.

Одним из постоянных физических факторов, от которого во многом зависит здоровье и работоспособность членов экипажа, является микроклимат, определяемый, с одной стороны, регионами плавания, а с другой — качеством работы систем жизнеобеспечения на судне: отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха, размещение кают, наличием в них технических устройств, выделяющих тепло [38], [39]. Физические свойства воздуха, обуславливающие терморегуляцию организма человека, представляют, прежде всего, совокупность температуры, влажности, скорости движения воздуха. В зависимости от состояния перегревания или охлаждения про-

цессы теплового обмена организма человека с окружающей средой сопровождаются напряжением физиологических функций, что может привести к нарушениям в состоянии здоровья персонала. В различных отделениях на судах морского флота температура воздуха значительно варьирует. Согласно наблюдениям, ее нормальные значения на ходовом мостике отмечаются, в среднем, в 70 % случаев, а в машинном отделении — лишь в 35 % случаев [40]. Климатогеографические условия плавания, тяжесть выполняемых физических работ во многом определяют уровень тепловой нагрузки, нарушая процессы терморегуляции с ухудшением состояния судовых специалистов и снижая их работоспособность [41], [42]. Работа экипажа в условиях арктического плавания сопровождается выраженными перепадами температуры воздуха, как наружного, так и внутри помещений. Значительная разность перепадов температуры зачастую приводит к охлаждению моряков и возникновению простудных заболеваний, которые составляют до 50 % от общего количества обращений за медицинской помощью [43] – [45].

Таким образом, рассмотрев только основные факторы судовой среды, можно сделать вывод о том, насколько специфичными являются условия жизнедеятельности моряков в рейсе. При оценке их влияния на состояние здоровья экипажа необходимо учитывать степень воздействия на организм комбинированных факторов судовой среды, их суммарный эффект [46] – [49].

Вывод. Труд плавсостава под воздействием факторов судовой среды вызывает в организме значительное напряжение адаптационных систем с возможным нарушением функционального состояния основных регуляторных систем, приводящим к ухудшению состояния здоровья и снижению трудоспособности. В связи с этим изучение влияния рассмотренных факторов на регуляторные системы организма в различных условиях плавания является важной медицинской проблемой в целях сохранения здоровья работников, увеличения продолжительности жизни путем создания качественных и безопасных условий труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рымина Т. Н.* Особенности воздействия стресса на работников плавсостава в условиях работы на море / Т. Н. Рымина, Е. В. Пятыхова // *Здоровье. Медицинская экология. Наука.* — 2014. — № 4 (58). — С. 103–105.
2. *Зайцев В. И.* Некоторые теоретические и практические аспекты изучения условий труда на флоте / В. И. Зайцев, С. А. Виноградов // *Здоровье населения и среда обитания.* — 2014. — № 2 (251). — С. 13–15.
3. *Мызников И. Л.* Состояние здоровья, заболеваемость и травматизм плавсостава Северного флота / И. Л. Мызников, А. В. Милошевский, Н. В. Аскерко [и др.] // *Авиакосмическая и экологическая медицина.* — 2013. — № 2 (47). — С. 13–20.
4. *Решняк В. И.* Профессиональная деятельность работников флота в условиях хронофизиологической адаптации / В. И. Решняк, А. Г. Щуров, О. В. Витязева // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2014. — № 6 (28). — С. 20–24.
5. *Голованов А. Е.* Влияние особенностей психики человека на процессы адаптации к укачиванию / А. Е. Голованов, Л. П. Макарова, Г. Г. Климентенок // *Молодой ученый.* — 2014. — № 4. — С. 357–361.
6. *Мацевич Л. М.* Факторы, формирующие среду обитания при эксплуатации объектов водного транспорта / Л. М. Мацевич, А. М. Вишневецкий, А. Б. Разлетова [и др.] // *Казанский медицинский журнал.* — 2009. — Т. 90. — № 4. — С. 597–600.
7. *Мельникова И. П.* Влияние производственных факторов на здоровье моряков / И. П. Мельникова // *Гигиена и санитария.* — 2007. — № 1. — С. 42–44.
8. *Майзель А. Б.* О влиянии корпуса и надстройки судна на формирование его внешнего воздушного шума, обусловленного работой механических источников / А. Б. Майзель // *Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова.* — 2008. — № 40. — С. 134–151.
9. *Измеров Н. Ф.* Человек и шум / Н. Ф. Измеров, Г. А. Суворов, Л. В. Прокопенко. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2001.
10. *Федосеева М. А.* Защита от шума на судах речного флота / М. А. Федосеева, М. К. Романченко // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2011. — № 3. — С. 130–133.

11. Горин С. В. Особенности использования глушителей гидродинамического шума на судах / С. В. Горин, М. В. Куклин // Судостроение. — 2010. — № 3. — С. 44–46.
12. Транковский Д. Е. Условия труда и профессиональная заболеваемость работников транспорта в Приморском крае / Д. Е. Транковский // Здоровье. Медицинская экология. Наука. — 2013. — № 4 (58). — С. 111–113.
13. Щербина Ф. А. Адаптивные реакции организма моряков рыбопромыслового флота в динамике 75-суточного рейса / Ф. А. Щербина // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Медико-биологические науки. — 2014. — № 3. — С. 91–99.
14. Евстафьев В. Н. Эргономическая оценка рабочих мест и психофизиологическая характеристика функции зрительного анализатора у плавсостава / В. Н. Евстафьев, О. Ю. Нетудыхатка // Актуальные проблемы транспортной медицины. — 2008. — № 2 (12). — С. 65–69.
15. Ильяева Е. Н. Медико-социальные аспекты потери слуха в трудоспособном возрасте / Е. Н. Ильяева // Медицина труда и промышленная экология. — 2009. — № 12. — С. 32–38.
16. Иванов В. И. Профилактика заболевания сердечно-сосудистой системы в практике корабельного врача / В. И. Иванов // Морской сборник. — 2013. — № 6 (1995). — С. 65–68.
17. Панов Б. В. Состояние здоровья моряков по результатам предварительных и периодических медицинских осмотров. Сообщение второе: показатели заболеваемости моряков возрастных и стажевых групп / Б. В. Панов, С. В. Балабан, С. Г. Чебан [и др.] // Актуальные проблемы транспортной медицины. — 2013. — № 4 (34). — С. 47–56.
18. Хугаева С. Г. Особенности адаптации моряков рыбопромыслового флота к экстремальным условиям плавания в условиях арктического севера / С. Г. Хугаева, С. В. Маруняк, И. М. Бойко [и др.] // Военно-медицинский журнал. — 2012. — Т. 333. — № 2. — С. 64–65.
19. Щербакова О. В. Исследование требований санитарных норм, предъявляемых к вибрации и шуму на речном транспорте / О. В. Щербакова, М. К. Романченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2010. — № 1. — С. 70–73.
20. Бородулина Е. В. Сравнительный анализ частоты и распространенности заболеваний пищеварительной системы у корабельных специалистов и моряков берегового состава / Е. В. Бородулина, Л. Н. Елисеева // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 3. — С. 37.
21. Симоненко В. Б. О структуре заболеваемости патологией органов пищеварения у моряков / В. Б. Симоненко, А. С. Александров, П. А. Дулин [и др.] // Военно-медицинский журнал. — 2008. — № 4 (329). — С. 58.
22. Ломов О. П. Физические факторы обитаемости кораблей и судов: монография / О. П. Ломов, И. М. Ахметзянов, М. О. Соколов [и др.]. — СПб.: Судостроение, 2014.
23. Кузнецов М. С. Экологическая безопасность на судне — основа жизни моряка / М. С. Кузнецов, И. С. Малышев, И. Л. Афонин // Водный транспорт. — 2012. — № 1 (13). — С. 68–71.
24. Рытков С. Н. Применение закрученных струй для поддержания микроклимата корабельных помещений / С. Н. Рытков // Морской сборник. — 2011. — Т. 1973. — № 8. — С. 34–36.
25. Дыбок В. В. Обеспечение экологической безопасности при работе транспортных средств и специальной техники с двигателями внутреннего сгорания в условиях ограниченных объемов / В. В. Дыбок, М. Г. Колмакнот // Техничко-технологические проблемы сервиса. — 2014. — № 1 (27). — С. 18–21.
26. Ханкевич Ю. Р. Анализ структуры и причин острых отравлений химической этиологии на Северном флоте / Ю. Р. Ханкевич, Н. В. Аскерко, И. Л. Мызников [и др.] // Воен.-мед. журн. — 2012. — № 2. — С. 48–52.
27. Морозов С. И. Условия труда и профессиональная заболеваемость работников водного транспорта в Приморском крае / С. И. Морозов, Д. Е. Транковский // Здоровье. Медицинская экология. Наука. — 2013. — Т. 52. — № 23. — С. 72–73.
28. Аполлонов Е. М. Проблемы повышения уровня безопасности судов и плавучих сооружений / Е. М. Аполлонов, Г. В. Бойцов, А. А. Захаров [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2001. — № 24. — С. 30–47.
29. Бойко П. А. Особенности технической эксплуатации судов, перевозящих сжиженные природные газы / П. А. Бойко // Водный транспорт. — 2012. — № 1 (13). — С. 22–29.
30. Шафран Л. М. Комплексный подход к решению проблемы химической безопасности на судах-газовозах / Л. М. Шафран, В. В. Голикова // Актуальные проблемы транспортной медицины. — 2013. — № 3 (33). — С. 34–44.

31. Engelen S. Transformations in gas shipping: Market structure and efficiency / S. Engelen, W. Dullaert // *Maritime Economics & Logistics*. — 2010. — № 12. — Pp. 295–325.
32. Хайдуков А. О. Система контроля паров и система регистрации сигнализации и индикации на нефтяных танкерах: учеб. пособие / А. О. Хайдуков, О. П. Хайдуков — Новороссийск: Новорос. гос. мор. акад., 2003.
33. Мамаенко Ю. В. Психофизиологические корреляты профессиональной адаптации моряков / Ю. В. Мамаенко, Е. В. Черненко // *Актуальные проблемы транспортной медицины*. — 2010. — № 1 (19). — С. 31–36.
34. Петрова Т. Б. Изменение параметров углеводного обмена у плавсостава Северного водного бассейна / Т. Б. Петрова, Я. И. Бичкаев, Ф. А. Бичкаева [и др.] // *Экология человека*. — 2009. — № 8. — С. 12–18.
35. Поляков И. В. Здоровье и проблемы организации медицинского обеспечения моряков дальнего плавания в современных условиях / И. В. Поляков, И. В. Колесников, В. В. Буров. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2004.
36. Кашутин С. Л. Проявление резервных и компенсаторных возможностей иммунных реакций при псориазе / С. Л. Кашутин, Ю. С. Дегтяр // *Российский журнал кожных и венерических болезней*. — 2007. — № 4. — С. 15–17.
37. Писарева Л. Ф. Рак почки в Приморском крае. Факторы риска / Л. Ф. Писарева, О. А. Ананина, И. Н. Одинцова [и др.] // *Урология*. — 2014. — № 5. — С. 62–66.
38. Ефремов С. Н. Анализ возможности автоматического управления системой кондиционирования воздуха на морских судах / С. Н. Ефремов, Г. В. Горобец, А. Б. Гончар // *Вісник СевНТУ*. — 2011. — № 119. — С. 199–203.
39. Курников А. С. Технологии кондиционирования воздуха на судах внутреннего и смешанного «река – море» плавания / А. С. Курников, А. С. Ширшин, Е. Г. Бурмистров // *Экология и промышленность России*. — 2006. — № 8. — С. 20–23.
40. Асмолов А. К. Адаптация моряков к условиям морских рейсов / А. К. Асмолов // *Морской медицинский журнал*. — 1997. — № 1. — С. 10–12.
41. Ишеков А. Н. Показатели стабилотрии в динамике арктического рейса / А. Н. Ишеков, И. Г. Мотягин // *Мир науки, культуры, образования*. — 2013. — № 4 (41). — С. 355–358.
42. Щёголева Л. С. Соотношение иммуно-гормональных реакций у лиц разных профессий в приполярном районе / Л. С. Щёголева, М. В. Меньшикова, Е. Ю. Шашкова // *Экология человека*. — 2009. — № 7. — С. 7–10.
43. Андреева Е. А. Функциональное состояние респираторной системы у больных пневмониями моряков Северного бассейна / Е. А. Андреева, Е. А. Соснина // *Функциональная диагностика*. — 2010. — № 3. — С. 67.
44. Леванюк А. И. Состояние иммунной системы у моряков / А. И. Леванюк // *Экология человека*. — 2010. — № 5. — С. 20–23.
45. Мозер А. А. Динамика заболеваемости и утраты трудоспособности у плавсостава Северного бассейна / А. А. Мозер, В. Д. Болотов, А. А. Коробицын // *Экология человека*. — 2000. — № 3. — С. 44–48.
46. Галанкин Л. Н. Инновационное развитие медицинского обеспечения на морском судне / Л. Н. Галанкин, В. В. Буров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 2 (24). — С. 9–16.
47. Гудков А. Б. Адаптивные реакции организма моряков рыбопромыслового флота / А. Б. Гудков, Ф. А. Щербина, И. Л. Мызников. — Архангельск: Северный государственный медицинский университет, 2011.
48. Жеглов В. В. Повышение устойчивости моряков к заболеваниям / В. В. Жеглов, Ф. М. Семёнов, В. И. Касаткин // *Морской сборник*. — 2012. — № 7 (1984). — С. 47–51.
49. Никитин А. М. Установление приоритетов при управлении техническим обслуживанием судовых технических средств / А. М. Никитин // *Сб. науч. тр. проф.-преп. сост. Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 130–132.

LIFE ACTIVITY CONDITIONS OF STAFF IN SIDE SEA CRAFT (REVIEW)

In scientific review was characterized a sea labor conditions in that perform sailors who have professional duties during a sea voyage. Factors that have a negative effect to sea staffs health were look. A most influence among

every thing is physical factors (noise, vibration, mechanical impulses, interfrequency and ionizing), chemical, climatogeographical, social and psychoemotionag. It was concluded about extremely condition of sea working. This labor environment causes an adaptation system tension with regulatory functions disturbances lead to working capacity and health reduction. It's noted that within the bounds of sea staffs medical support it's very important for founding of qualifies and labor safety.

Keywords: sailor work, negative professional factors, health, adaptation.

REFERENCES

1. Rimina, T. N. and E. V. Pyatyrova. "Features of the impact of stress on employees seafarers in terms of working in the sea." *Health. Medical ecology. Science* 4(58) (2014): 103–105.
2. Zaytsev, V. I. and S. A. Vinogradov. "Some theoretical and practical aspects of studying of working conditions on fleet." *Zdorovyie naseleniya I sreda obitaniya*. 2(251) (2014): 13–15.
3. Myznikov, I. L., A. V. Miloshevsky, N. V. Askerko, et al. "Health, mobility and injury rate among the north fleet seafaring personnel." *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* 2(47) (2013): 13–20.
4. Reshnyak, V. I., A. G. Shchurov and O. V. Vityazaeva. "Professional activities of fleet workers in conditions of chronophysiological adaptation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 20–24.
5. Golovanov, A. E., L. P. Makarova and G. G. Klimentenok. "The influence of peculiarities of mentality of the person on the processes of adaptation to motion sickness." *Young Scientist* 4 (2014): 357–361.
6. Matsevich, L. M., A. M. Vishnevskij, A. B. Razletova, et al. "The factors forming environment during operation of water transport units." *Kazan Medical Journal* 90.4 (2009): 597–600.
7. Melnikova, I. N. "Influence of occupational factors on sailors health." *Gigiena i sanitariya* 1 (2007): 42–44.
8. Maizel, A. B. "O vliyaniy corpusa I nadstroiki sudna na formirovanie ego vneshnego vozdušnogo shuma, obuslovlennogo rabotoy mehanicheskikh istochnikov." *Trudy CNIi nam. acad. A.N. Krylov* 40 (2008): 134–151.
9. Izmerov, N. F., G. A. Suvorov and L. V. Prokopenko. *Chelovek i shum*. M: GEOTAR Med, 2001.
10. Fedoseeva, M. A. and M. K. Romanchenko. "Zaschita ot shuma na sudah rechnogo flota." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3 (2011): 130–133.
11. Gorin, S. V. and M. V. Kuklin. "Peculiarities of hydrodynamic noise dampers application on ships." *Sudostroenie* 3 (2010): 44–46.
12. Trankovsky, D. E. "Working conditions and occupational morbidity transport workers in Primorsky kraj." *Health. Medical ecology. Science* 4(58) (2013): 111–113.
13. Shcherbina, F. A. "Adaptive response in fishing fleet seamen during a 75-day's voyage." *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series: Medical and Biological Sciences* 3 (2014): 91–99.
14. Yevstafiev, V. N. and O. U. Netudikhatka. "Ergonomic to assess working places and psycho-physiologic characteristic function of visual analyzer of seamen." *Actual problems of transport medicine* 2(12) (2008): 65–69.
15. Ilkaeva, E. N. "Medical and social aspects of deafness at able-bodied age." *Occupational Medicine and Industrial Ecology* 12 (2009): 32–38.
16. Ivanov, V. I. "Profilactika zabolevaniy serdechno-sosudistoy sistemy v praktike korabelnogo vracha." *Morskoy sbornik* 6(1995) (2013): 65–68.
17. Panov, B. V., S. V. Balaban, S. G. Tchegan, et al. "Health condition of the seamen according to the results of their preliminary and periodic medical examinations. The second message: figures of the morbidity of the seamen of the aged and experienced groups." *Actual problems of transport medicine* 4(34) (2013): 47–56.
18. Khugaeva, S. G., S. V. Marunyak, I. M. Boyko, and I. G. Mosyagin. "A fleet seamen adaptation features to extreme arctic fishery voyage conditions." *Military-medical journal* 2(333) (2012): 64–65.
19. Scherbakova, O. V. and M. K. Romanchenko. "Research of requirements of sanitary norms, recommended for vibration and noise on a river transport." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2010): 70–73.
20. Borodulina, E. V. and L. N. Eliseeva. "Comparative analyses of incidence and prevalence of digestive system diseases in shipboard and coastal mariners." *Modern problems of science and education* 3 (2012): 37.
21. Simonenko, V. B., A. S. Alexandrov, P. A. Dulin, et al. "O structure zabolevaemosti patologiy organov pischevareniya u moryakov." *Military-medical journal* 4(329) (2008): 58.

22. Lomov, O. P., I. M. Akhmetzyanov, M. O. Sokolov, et al. *Fizicheskie factory obitaemosti korabley i sudov*. SPb.: Sudostroenie, 2014.
23. Kuznetsov, M. S., I. S. Malyshev and I. L. Afonin. "Ecologicheskaya bezopasnost na sudne – osnova zhizni moryaka." *Vodny transport* 1(13) (2012): 68–71.
24. Rytkov, S. N. "Primenenie zakruchennyh strui dlya podderzhaniya mikroklimata korabelnyh pomescheniy." *Morskoy sbornik* 8(1973) (2011): 34–36.
25. Dybok, V. V. and M. G. Kolmkant. "Ensuring environmental safety at work vehicles and special equipment with internal combustion engines in conditions of limited quantities." *Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa* 1(27) (2014): 18–21.
26. Khankevich, Yu. R., N. V. Askerko, I. L. Myznikov, and V. I. Domashov. "Analysis of the structure and causes of acute poisoning of chemical etiology in the Northern Fleet." *Military-medical journal* 2 (2012): 48–52.
27. Morozova, S. I. and D. E. Trankovsky. "Working conditions and occupational disease workers water transportation in Primorsky region." *Health. Medical ecology. Science* 2-3(52) (2013): 72–73.
28. Apollonov, E. M., G. V. Boytsov, A. A. Zakharov et al. "Problemy povysheniya urovnya bezopasnosti sudov i plavuchih sooruzheniy." *Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 24 (2001): 30–47.
29. Boyko, P. A. "Features technical operation of ships carrying liquefied natural gases." *Vodny transport* 1(13) (2012): 22–29.
30. Shafran, L. M. and V. V. Golikova. "A Comprehensive approach to the problems solving of chemical safety on marine gas carriers." *Actual problems of transport medicine* 3(33) (2013): 34–44.
31. Engelen, S. and W. Dullaert. "Transformations in gas shipping: Market structure and efficiency." *Maritime Economics & Logistics* 12 (2010): 295–325.
32. Khaydukov, A. O. and O. P. Khaydukov. *Sistema kontrolya parov i sistema registracii signalizacii i indikacii na neftyanyh tankerah*. Novorossiysk: NSMA, 2003.
33. Mamaenko, Yu. V. and E. N. Chernenko. "Psychophysiological correlates of occupational adaptation of seamen." *Actual problems of transport medicine* 1 (2010): 31–36.
34. Petrova, T. B., Ya. I. Bichkaev, F. A. Bichkaeva, et al. "The change of parameters of carbohydrate metabolism at water workers of the northern water pool." *Human Ecology* 8 (2009): 12–18.
35. Polyakov, I. V., I. V. Kolesikov and V. V. Burov. *Zdorovye i problemy organizacii medicinskogo obespecheniya moryakov dalnego plavaniya v sovremennyh usloviyah*. SPb.: Gosudarstvennaya akademiya imeni admirala S.O. Makarova, 2004.
36. Kashutin, S. L. and Yu. S. Degtyar. "The manifestation of reserve and compensatory capacities of immune reactions in psoriasis." *Rossiiskii Zhurnal Kozhnykh i Venericheskikh Bolezney* 4 (2007): 15-17.
37. Pisareva, L. F., O. A. Ananina, I. N. Odintsova, et al. "Renal cancer in the Primorye territory. Risk factors." *Urologiya* 5 (2014): 62–66.
38. Efremov, S. N., G. V. Gorobets and A. B. Gonchar. "Analysis of the possibility to automatically control the system of air conditioning at the sea ships." *Vestnik SevNTU* 119 (2011): 199–203.
39. Kurnikov, A. S., A. S. Shirshin and E. G. Burmistrov. "Tehnologii kondicionirovaniya vozduha na sudah vnutrennego i smeshannogo "reka-more" plavaniya." *Ekologiya i promyshlennost Rossii* 8 (2006): 20-23.
40. Asmolov, A. K. "Adaptaciya moryakov k usloviyam morskikh reysov." *Morskoy medicinsky zhurnal* 1 (1997): 10–12.
41. Ishekov, A. N. and I. G. Mosyagin. "Indices of stabilometry during Arctic voyage." *Mir nauki, kultury, obrazovaniya* 4(41) (2013): 355–358.
42. Shchogoleva, L. S., M. V. Menshikova and E. Yu. Shashkova. "Correlation of immunohormonal reactions in persons of varied employment in circumpolar region." *Human Ecology* 7 (2009): 7–10.
43. Andreeva, E. A. and E. A. Sosnina. "Funkcionalnoe sostoyanie respiratornoy sistemy u bolnyh pnevmoniyami moryakov severnogo basseyna." *Funkcionalnaya diagnostika* 3 (2010): 67.
44. Levanyuk, A. I. "The immune status among sailors." *Human Ecology* 5 (2010): 20–23.
45. Mozer, A. A., V. D. Bolotov and A. A. Korobitcin. "Dinamika zaboлеваemosti i utraty trudosposobnosti u plavsostava severnogo basseyna." *Human Ecology* 3 (2000): 44–48.
46. Galankin, L. N. and V. V. Burov. "The new technical and organizational approach in medical support on a ship." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 9–16.

47. Gudkov, A. B., F. A. Shcherbina and I. L. Myznikov. *Adaptivnyye reakcii organisma moryakov rybpromyslovogo flota*. Archangelsk: SGMU, 2011.

48. Zheglov, V. V., F. M. Semyonov and V. I. Kasatkin. "Povyshenie ustoychivosty moryakov k zabolevaniyam." *Morskoy sbornik* 7(1984) (2012): 47–51.

49. Nikitin, A. M. "Ustanovlenie prioritetrov pri upravlenii tehnikeskimi obsluzhivaniem sudovykh tehnikeskikh sredstv." *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatelskogo sostava gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2014: 130–132.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кубасов Роман Викторович —
кандидат биологических наук, доцент.
Северный государственный
медицинский университет (г. Архангельск).
romanas2001@gmail.com

Лупачев Валерий Валентинович —
доктор медицинских наук, профессор.
Северный государственный
медицинский университет (г. Архангельск),
Северный (арктический) федеральный
университет имени М.В. Ломоносова.
valerii-lvv@mail.ru

Попов Михаил Владимирович —
кандидат медицинских наук.
Северный государственный
медицинский университет (г. Архангельск).
michael.vlad.popov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Koubasov Roman Viktorovich –
PhD, associate professor.
Northern State Medical University (NSMU),
Archangelsk
romanas2001@gmail.com

Lupachev Valery Valentinovich –
Dr. of Medical Sciences, professor.
Northern State Medical University (NSMU),
Archangelsk,
Northern Arctic Federal University (NArFU),
Archangelsk
valerii-lvv@mail.ru

Popov Michael Vladimirovich –
PhD.
Northern State Medical University (NSMU),
Archangelsk
michael.vlad.popov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14 августа 2015 г.

УДК 656.611

**И. А. Руснов,
И. А. Гаврилова,
А. Г. Нелогов**

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ НАКАНУНЕ ПРИНЯТИЯ КОНВЕНЦИИ ООН О КОДЕКСЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ

В статье рассмотрены вопросы развития линейного судоходства и взаимоотношений линейных конференций с грузоотправителями накануне обсуждения в ООН Конвенции о Кодексе поведения линейных конференций. Авторами обоснован тезис о том, что обсуждению положений Кодекса в ООН предшествовали значительные изменения рынка линейных перевозок. Сделан вывод о том, что разрушения колониальной системы привели к изменению сложившегося в течение столетий порядка в области торгового судоходства и подорвали могущество конференций, появились грузовладельцы и перевозчики, представляющие развивающиеся страны, значительных масштабов достигла консолидация капиталов, поддерживаемая и регулируемая правительствами капиталистических государств. Отмечается, что обострившиеся между национальными, транснациональными группами грузовладельцев и перевозчиков противоречия привели к торговым войнам между отдельными государствами. Установлено, что действенной силой на рынке морских линейных перевозок стали советы и ассоциации грузовладельцев. Выявлены масштабные изменения, которые предопределили начало процесса выработки Кодекса поведения линейных конференций, при этом каждая из договаривающихся сторон, приступая к работе над Кодексом, преследовала собственные цели.

Ключевые слова: линейные конференции, судоходство, морские перевозки, фрахтовый рынок, конференциальные соглашения.

Введение

Линейное судоходство появилось в первой четверти XIX в. Полвека спустя, в 1875 г., стремясь к сокращению острой и разрушительной конкуренции, британские судовладельцы создали объединение линейных перевозчиков на направлении порты Великобритании – порты Индии (Калькутта). Соглашение, получившее название Калькуттской конференции (United Kingdom Calcutta Conference), положило начало всемирному распространению конференциальной системы в линейном судоходстве, о чем свидетельствуют многие исследования, в частности, работы А. Чеботаренко [1] и Е. В. Кирилловой [2], в которых отмечается, что Калькуттская конференция находится в основе всех линейных конференций.

Целесообразно привести определение линейной конференции, содержащееся в гл. 1 Конвенции о Кодексе поведения линейных конференций 1974 г. (далее — Кодекс): *«Линейная Конференция или Конференция — группа, состоящая из двух или более перевозчиков, эксплуатирующих суда, которые предоставляют услуги по международным линейным перевозкам грузов на определённом направлении или направлениях в обусловленных географических пределах и которые имеют соглашение или договорённость, независимо от их характера, в рамках которых они осуществляют перевозки по единым или общим тарифным ставкам и на любых других согласованных условиях в отношении предоставления линейных услуг»* [3, с. 95].

В течение относительно непродолжительного периода времени конференции получили широкое распространение и начали контролировать практически все основные направления морских линейных перевозок. В отдельных вопросах интересы национальных судоходных компаний и групп компаний противоречили интересам других национальных или транснациональных групп, а иногда интересы государства вступали в противоречие с интересами компаний и т. д. Противостояние линейных перевозчиков и грузовладельцев (клиентуры морского транспорта, фрахтователей) было одним из наиболее острых и постоянных. Так, советский учёный В. В. Петровский, принимавший участие в работе ООН над Кодексом поведения линейных конференций, в монографии «Морское линейное судоходство» [4, с. 149] отмечал следующее: *«Овладение конференциями большинством судоходных направлений вызвало у грузоотправителей необходимость использования конференциального тоннажа на этих направлениях. Поскольку большинство линейных перевозчиков объединены в конференции, т. е. организованы в довольно сильные судоходные картели, их позиция на рынке, безусловно, является более прочной, чем позиция большинства грузоотправителей, которые не имеют подобной организации, способной действительно защищать их интересы на мировом фрахтовом рынке линейного тоннажа. Такое «неравноправное» положение линейных перевозчиков и фрахтователей на рынке нередко приводит к острым столкновениям интересов»*. Таким образом, естественным ответом грузовладельцев на совместные действия перевозчиков было создание равноценного по влиянию на рыночную ситуацию объединения грузовладельцев. Однако в течение многих десятилетий эта задача была неразрешимой.

Первым успешным опытом совместных действий грузовладельцев явилась работа Совета британских грузоотправителей (*The British Shipper Council*). Согласно данным источника [5], начиная с 1955 г., т. е. с момента образования этого объединения, возник новый этап во взаимоотношениях грузовладельцев и линейных конференций. Именно в этот период появилась практика проведения взаимных консультаций (совет грузовладельцев — линейные конференции) по вопросам установления или изменения тарифных ставок. Впервые с начала работы линейных конференций фрахтовая политика последних стала системно учитывать мнение фрахтователей. В дальнейшем различные советы грузовладельцев начали играть заметную роль на рынке линейных перевозок. В настоящее время советы грузовладельцев, представленные в том или ином виде, утвержденном международным и национальными законодательствами, оказывают влияние на рынок мирового судоходства в целом и на рынок морских линейных контейнерных перевозок в частности. Формально это проявляется посредством участия в обсуждениях принципиальных вопросов современного судоходства, например, сохранения или отмены ограничения действия антимонопольного законодательства в отношении линейных конференций. Фактически, консоли-

дированная грузовая база позволяет проявлять рыночную власть и добиваться лучших условий для участников таких объединений.

Вопросы взаимоотношений линейных конференций с грузоотправителями

Вслед за созданием Совета британских грузоотправителей на основании рекомендаций Международной торговой палаты подобные союзы были созданы в капиталистических европейских странах: Бельгии, Дании, ФРГ, Финляндии, Франции, Греции, Италии, Нидерландах, Норвегии, Швеции и Швейцарии. Процесс образования таких союзов происходил также и в других странах мира. В частности, ассоциации «Western India Shippers Association» и «Eastern India Shippers Association» были созданы в 1962 г. в Индии; в 1964 г. в Австралии была создана ассоциация «Australian Europe Shippers Association» (AESA), представляющая интересы австралийских грузоотправителей, которые осуществляют свои отгрузки на конференциальном тоннаже на направлении Австралия – Европа. Несмотря на то, что все эти объединения грузоотправителей в связи с различием частных интересов не имели такой хорошей организации, как конференции, нельзя недооценивать сам факт постоянного и постоянно усиливающегося влияния советов грузоотправителей, особенно в период низкой конъюнктуры (низкого рынка) в судоходстве, когда отдельные линии и конференции готовы были пойти на существенные уступки.

Основная деятельность советов грузоотправителей, в том числе европейских, сводилась к стремлению устранить недостатки в работе перевозчиков, выдвижению конкретных требований в области улучшения линейного сообщения, а также к оптимизации условий конференциальных тарифов. Грузоотправители выдвигали требования в области организации линейного судоходства, основные из которых сводились к следующему:

- отходы судов регулярных линий должны производиться не только в соответствии с установленными сроками, но также через равномерные промежутки времени;
- в расписаниях должны указываться не только даты отхода, но также и даты прибытия судов с учетом извещений об опозданиях, вызванных особенностями морской перевозки;
- расписания не должны изменяться внезапно, т. е. в каждом случае эти изменения должны сообщаться грузоотправителям в циркулярах и заблаговременно публиковаться в прессе;
- проформы коносаментов должны быть унифицированы.

Особой критике подвергались так называемые *контракты лояльности*. По мнению грузовладельцев, они не регулировали должным образом взаимоотношения между грузоотправителями и судоходными конференциями. В случае формального нарушения соглашения грузовладелец терял все преференции и полученные преимущества. В то же время наличие контракта не гарантировало своевременное и полное предоставление услуг перевозчиком. Значительные сложности возникали у грузовладельцев, имевших контракты лояльности с определённой линией, при выходе ее из состава конференции. В таком случае у грузовладельца возникали обязательства перед другими членами конференции и отсутствовала возможность продолжить работу с линией, вышедшей из состава конференции.

Значительной критике со стороны грузовладельцев подверглась система конференциальных тарифов. Особенно возникло много возражений против их секретности. Грузовладельцы заявляли о том, что публикация конференциального тарифа в значительной степени облегчит калькуляцию и создаст атмосферу стабильности и доверия. В то же время грузовладельцы достигли существенного прогресса в части, касающейся открытости тарифов. Требования относительно публикации тарифов и сейчас содержатся в нормативных актах многих государств, определяющих конфигурацию мирового рынка морских перевозок. Тем не менее, в настоящее время принцип открытости тарифа можно считать отчасти устаревшим в связи с активным использованием конфиденциальных сервисных контрактов. Федеральная морская комиссия США в качестве одного из преимуществ нового Закона о судоходстве (Ocean Shipping Regulation Act, 1998) отмечает в работе [6] *отход от принципа равных ставок*, так называемый «*metoo*».

Как отмечается в работе [7], грузовладельцы выдвигают ряд иных требований, связанных с конференциальными тарифами, с улучшением порядка котировки тарифных ставок, применением общего изменения тарифных ставок (General Rate Increase) и т. д. Тем не менее, по данным источника [8], даже спустя несколько лет после принятия кодекса, Конференцией ООН по торговле и развитию (ЮНКТАД) отмечалось отсутствие единого, чёткого и официально сформулированного методического подхода к формированию ставок фрахта. В частности, в статье [9] говорится, что в дальнейшем принципы формирования тарифных ставок не стали более открытыми и понятными.

Натиску грузоотправителей многие конференции противопоставляли консолидацию своих рядов, т. е. объединение в более крупные организации, призванные защищать интересы конференциальных линий. Одним из примеров такого объединения конференций является организованный в 1963 г. Комитет европейских национальных ассоциаций судовладельцев (КЕНСА) (CENSA — The Committee of European National Shipowners Associations. Толчком к его организации послужила Резолюция европейских министров транспорта от марта 1963 г., в которой отмечалось, что система линейных конференций является для судовладельцев независимым средством, предоставляющим им возможность оказывать грузоотправителям постоянные транспортные услуги на базе стабильных ставок. В дальнейшем этим комитетом был предложен один из вариантов Кодекса о поведении линейных конференций, который был отклонён другими сторонами, участвующими в обсуждении.

Большая работа по урегулированию и регламентации взаимоотношений между грузовладельцами и линейными конференциями, а также между конференциями и судовладельцами развивающихся стран была проведена в рамках Комитета ЮНКТАД по судоходству. Так, в Резолюции Комитета по судоходству ЮНКТАД 1964 г., относящейся к вопросам морского судоходства, были найдены точки соприкосновения многих сторон, участвовавших в обсуждении. В частности, в ней говорилось о том, что система конференций необходима для обеспечения стабильности фрахтовых ставок и регулярного обслуживания. Но для того, чтобы эта система могла полноценно функционировать, необходимо установить тесное сотрудничество между грузоотправителями и участниками конференций. Система конференций была признана всеми членами ЮНКТАД, которые также отмечали её вклад в признании необходимости ориентироваться в своей деятельности на сотрудничество с линейными конференциями.

В отечественной литературе отмечались определённые преимущества конференциальной системы в линейном судоходстве. К ним относилось высокое качество услуг, предоставляемых конференциальным тоннажем, что являлось следствием технического совершенства линейных судов и высокой организации работы линий в составе конференций. При этом, в частности, В. В. Петровский в работе [4] отмечал, что линейные конференции представляют собой монополистические объединения судовладельцев, являющихся подчас одним из мощных инструментов внешней политики развитых стран, проводимой ими по отношению к развивающимся странам, посредством которых капиталистические монополии контролируют внешнюю торговлю и судоходство этих стран.

Проблемы развития линейного судоходства

Большой интерес в целях понимания нынешней ситуации в мировом линейном судоходстве представляет информация о проблемах линейного судоходства, которые имели место в середине 1970-х гг. XX в., т. е. накануне обсуждения Кодекса. Наиболее полно и ярко ситуация раскрыта в работе В. В. Петровского [4]. В то время, с учётом темпов расширения географии и объёмов перевозок генеральных грузов на основе новых технологических методов, ожидалось, что даже первоклассные линейные суда, сроки эксплуатации которых были рассчитаны на 12 – 17 лет, работающие в то время на неконтейнеропригодных направлениях, через 10 – 12 лет окажутся абсолютно неконкурентоспособными и будут приносить убытки своим владельцам. На наиболее контейнеронасыщенном направлении (Северная Атлантика) этот процесс начался на несколько лет раньше, в 1967 г.

Замена тоннажа, связанная с большими капиталовложениями, была под силу только крупнейшим судоходным монополиям и вызвала необходимость дальнейшей концентрации и централизации капитала, а организация работы этого тоннажа требовала также дальнейшей концентрации производства. Однако само явление концентрации не было новым. Суть концентрации капитала в линейном судоходстве подробно изложена в начале XX в. австрийским учёным Э. Заксом в работе «Пути и средства сообщения в народном хозяйстве» [10]. Однако поистине фантастических масштабов консолидация капитала в судоходстве достигла именно в период, предшествовавший появлению Кодекса. Можно предположить, что этот документ явился также ответом на явление концентрации и централизации капитала.

Процессы консолидации были связаны с расширением интеграции, порождающей новые международные сверхмонополии в виде судоходных контейнерных консорциумов или суперконференций. Примером огромной централизации капитала в линейном судоходстве в национальном масштабе может служить слияние крупнейших западногерманских линейных компаний «Hamburg-American Line» (Hapag) и «North German Lloyd» (Lloyd), образовавших консорциум «Hapag-Lloyd AG», в составе которого сразу оказалось более 117 линейных судов общим дедвейтом свыше 1,1 млн т. К числу основных держателей акций этого консорциума в то время относились крупнейшие банки ФРГ «Deutsche Bank AG» и «Dresdner Bank AG».

Следует отметить, что начиная с 1967 г. консорциум «Hapag-Lloyd» приступил к замене своего ещё очень современного традиционного линейного тоннажа контейнеровозами, годовая провозная способность которых к 1970 г. оценивалась суммой, равной 2 млн т. В настоящее время эта компания является одной из десятка глобальных контейнерных перевозчиков, формирующих мировой рынок морских линейных контейнерных перевозок.

Первый английский контейнерный консорциум «Overseas Container Ltd.» (OCL), в состав которого входили крупнейшие линейные монополии и даже группы, был основан с капиталом свыше 50 млн фунтов стерлингов. Контрольный пакет акций крупнейшей английской судоходной группы «Cunard», специализировавшейся на линейных перевозках (из шестидесяти судов пятьдесят заняты на грузовых линиях), принадлежала Банку Ллойда. К концу 60-х гг. XX в. относится появление национальных и международных монополий, которые создавались при прямой или косвенной поддержке капиталистических и развивающихся государств. В этой связи достаточно вспомнить проведенную законодательным путем и завершённую в 1968 г. японским правительством «Shipping and Shipbuilding Rationalization Council» (правительственный орган) операцию по укрупнению флота посредством организации шести монополистических групп, состоящих из 97 судоходных компаний, владеющих к середине 1964 г. 81 % линейного тоннажа Японии. При этом Банк развития Японии был ответственным за проведение данной интеграции. Процесс такого грандиозного слияния подробно описан в работе советского учёного Г. А. Левикова [11]. В результате сформировались такие известные компании, как MitsuiOSK, NYK, K-Line, в большей степени соответствующие их современному состоянию.

Поддержка, оказанная, в первую очередь, линейному судоходству, особенно ярко была выражена в США, где большую роль играли судостроительные и даже эксплуатационные субсидии. Ориентировочная сумма субсидий, выплаченных американским судоходным монополиям в 1964 – 1965 гг., составила 200 млн долл. Подобные субсидии были распространены приблизительно на 45 % частных сухогрузных судов США и предоставлялись только владельцам линейного тоннажа, обслуживавшим важнейшие направления внешнеторговых перевозок. На эксплуатационные субсидии с 1967 г. было ассигновано 185 млн долл. Правительством США особо поощрялись судоходные компании, флот которых мог быть использован в военных целях. Именно эта причина во многом способствовала быстрому росту одной из крупнейших линейных компаний «Sea Land», которая в 1956 г. явилась пионером внедрения автомобильно-морской транспортировки грузов в Северной Атлантике. Позже Sea Land была поглощена датским консорциумом А. Р. Møller-Mærsk Gruppen, в линейных перевозках известным как Maersk Line.

В середине прошлого века в практике линейного судоходства отмечались многочисленные примеры, показывающие процессы диверсификации в капиталистической экономике, а также сращивания судоходного капитала с банковским и промышленным капиталом или поглощения крупными монополиями более мелких компаний. В этой связи необходимо отметить, что контроль Sea Land осуществлялся компанией «R. J. Reynolds Industries Inc.», которая являлась дочерней компанией табачной монополии США «R. J. Reynolds Tobacco Co.». Таким образом, уже в то время можно было говорить о фактическом контроле над крупнейшими линейными судоходными предприятиями со стороны правительств капиталистических государств. Большинство наиболее значимых событий в отрасли происходило с непосредственным участием правительств этих стран.

Появлению Кодекса предшествовали острые противоречия между различными силами, в той или иной мере участвующими или заинтересованными в результатах работы линейных перевозчиков и их объединений. Сейчас может показаться неожиданным и удивительным развернувшееся в 1965 г. и продолжавшееся почти целое десятилетие противостояние США и Великобритании в области линейных перевозок по поводу структуры фрахтовых ставок в перевозках между североатлантическими портами США и портами Англии. Этот инцидент на уровне правительственных органов явился продолжением спора, возникшего еще в 1961 г. с введением в США так называемого «Bonner Act, 1961». В соответствии с этим законом конференциальным линиям разрешалось применять контрактную систему с двойными ставками. Согласно данным источника [12], практическое применение системы осуществлялось под жёстким контролем со стороны Федеральной морской комиссии (ФМК) США вплоть до урегулирования уровня конференциальных ставок.

Введенная поправка к законодательству США о регулировании морских перевозок от 1961 г. соответствовала интересам как правительства, так и деловых кругов США. Более того, этот закон был воспринят европейскими и азиатскими перевозчиками как попытка крайне жесткого регулирования линейного судоходства, в США «Bonner Act, 1961» рассматривался как результат компромиссного, т. е. более «мягкого решения». Поскольку это затрагивало жизненные интересы многих европейских линейных компаний — членов конференций, работающих из портов США, дискуссия проводилась на правительственном уровне и явилась причиной серьезных дипломатических протестов в связи со сложившимся тогда в США мнением о том, что иностранные линии — члены американских конференций применяли более высокие ставки в направлении из США, чем обратно. Все это отрицательно сказалось на ценах американских товаров, подрывая, по мнению американских властей, экспорт из США. ФМК потребовала от некоторых конференций, работающих из портов США, снизить свои ставки до уровня ставок конференций, работающих на порты США.

Кроме того, перед конференциями было выдвинуто требование о представлении ФМК таких отчетных документов, которые фактически раскрывали бы всю картину коммерческой деятельности линий — членов конференций. Недовольство конференций действиями ФМК послужило причиной вспыхнувшего в конце 1963 г. открытого международного конфликта. В результате 10 европейских морских стран и Япония заявили дипломатические протесты США. Сложившуюся в те годы ситуацию на международной арене практически невозможно представить в современном мире.

Обстановка еще более накалилась после требования ФМК в марте 1964 г. аннулировать существующие конференциальные контракты и перезаключить их по проформе, одобренной ФМК, в течение 90 дней. Конфликт между странами был смягчен компромиссной договоренностью, достигнутой в Париже между правительствами США, тринадцатью европейскими странами (Бельгия, Дания, Финляндия, Франция, ФРГ, Греция, Нидерланды, Ирландия, Италия, Норвегия, Испания, Швеция, Великобритания) и Японией о том, что ФМК будет получать только часть требуемой ею документации, причем не от отдельных линий и конференций, а официальные данные от правительственных органов стран. Все это показывает уровень участия правительств иностранных

государств в решении вопросов, относящихся к международному морскому линейному судоходству в частности и влиянию судоходства на мировую экономику в целом.

Дальнейшие события также не привели к урегулированию разногласий в области линейного судоходства. В конце 1967 г. на североатлантическом направлении разразилась новая «война», объявленная Североатлантической ассоциацией грузоотправителей (NASA) ФМК, в которую было вовлечено и правительство Великобритании. В 1968 г. ФМК вновь объявила о том, что конференции, осуществляющие действия между портами США и Великобритании, должны давать 90-дневный нотис до намечаемого повышения ставок (GRI). Это вызвало новые разногласия и протесты со стороны конференций и отдельных линейных компаний. Все попытки ФМК урегулировать линейное судоходство сводились к тому, что флот США перевозил 7 % американских экспортно-импортных грузов, зарабатывая при этом только 1 млрд долл. ФМК имела намерения обеспечить для флота США 50 % грузов, утверждая при этом, что если ее суда перевезут 50 % своих внешнеторговых грузов, то общий неблагоприятный платежный баланс будет полностью ликвидирован.

На фоне общего ухудшения в начале 70-х гг. XX в. экономического положения развитых экономических стран необходимо выделить два явления: глубокую инфляцию и энергетический, или топливно-сырьевой кризис. В работе [13], в частности, отмечается, что уже в 1973 г. в результате нефтяного кризиса судоходство столкнулось с проблемой нехватки бункера. Конференции отреагировали на это введением специальной надбавки за бункер — «bunker surcharge» или «energy surcharge» или «bunker adjustment factor» (BAF) и т. д., которая выражалась в определенных денежных единицах или в процентах к ставке. Установление бункерной надбавки обычно сопровождалось так называемой рационализацией сервиса конференций, т. е. увеличением загрузки судов за счет сокращения числа отходов, и числа портов захода, а также снижения скорости судов в целях экономии бункера. Девальвация валют и установление «плавающих» курсов привели к повсеместному распространению в конференциальных тарифах специальных валютных надбавок — «currency adjustment factor» (CAF).

Создавшаяся ситуация нашла свое отражение в условиях бронирования грузов на линейный тоннаж, в формулярах коносаментов и букинг-нот. Так, например, «Atlantic Container Line Ltd.» применила в коносаментах специальную оговорку «Oil crisis clause», согласно которой судовладелец имел право на любую девиацию и (или) на выполнение рейсов с пониженной скоростью с целью экономии бункера, при этом ограничив свою ответственность за какую-либо задержку в доставке груза, его потерю или повреждение и т. д. Таким образом, в статье [14] отмечается, что стороны сами посредством коносамента стали регулировать возникающие между ними отношения. Все это, естественно, очень обострило и без того довольно серьезные противоречия между линейными судовладельцами, конференциями, с одной стороны, и грузоотправителями и их союзниками, с другой. Выражением недовольства грузоотправителей явилась острая критика подобной практики конференций, которая нашла свое отражение в многочисленных специальных заявлениях и обращениях союзов грузоотправителей.

Внешнеэкономическая и торговая экспансии развитых капиталистических стран были тесно связаны с противоречиями в области судоходства, возникшими в результате крушения колониальной системы, между интересами крупнейших империалистических держав и развивающихся стран мира. Развитие линейного судоходства в период, предшествовавший появлению Кодекса, проходило на фоне разрушения сложившихся за столетия связей между метрополиями, колониями и доминионами. Подавляющее большинство развивающихся стран, в силу своей удаленности от крупных промышленных центров и особенностей структуры производства и внешней торговли, находились в большой зависимости от судоходства. Несмотря на значительный рост национальных флотов развивающихся стран, зависимость этих стран от услуг иностранных судовладельцев практически не уменьшилась. В 1965 г. развивающимся странам принадлежало 7,3 % тоннажа мирового флота, в 1975 г. эта доля сократилась до 6 % (в частности, в работе [15] отмечается, что большой интерес представляет опыт СССР по преодолению зависимости от иностранных перевозчиков).

Доля развивающихся стран в мировом флоте являлась непропорционально низкой, и ни одна из этих стран не была в состоянии обеспечить своим флотом собственные нужды в области мор-

ских перевозок. Такое же положение сложилось для развивающихся стран и в области линейного судоходства, поскольку их линейный флот составляет менее 10 % мирового линейного флота. В связи с этим развивающиеся страны были вынуждены тратить огромные суммы на фрахтование иностранного тоннажа. Доля фрахта в стоимости таких экспортных товаров развивающихся стран, как кофе, чай, хлопок, сахар и каучук, составляла 3 – 8 %, а таких товаров, как железная руда, фосфаты, лес и т. п., — свыше 20 %. Доля фрахта в стоимости импортных товаров колебалась в пределах 7 – 15 %. Такие данные приводит в своей работе [4] В. В. Петровский, указывая также, что имеются все основания считать эти цифры заниженными.

Следует отметить, что в то время происходило повышение ставок фрахта на грузы развивающихся стран при одновременном падении цен на эти товары. В результате сложившейся ситуации покупательная способность сырья по отношению к фрахтам снизилась почти на 25 %. О масштабах неэквивалентности в области линейных перевозок и потерь для платежного баланса развивающихся стран можно судить по данным, касающимся фрахтовых платежей индийских экспортеров и импортеров, которые составили в 1964 – 1965 гг. 2100 млн рупий, в том числе 420 млн рупий было заработано индийскими линиями, а 1680 млн рупий фрахта было уплачено иностранным судоходным компаниям. Конфликт между этими полюсами в судоходстве обсуждался, прежде всего, в рамках ООН и, в частности, в Комитете по судоходству Конференции ООН по торговле и развитию ЮНКТАД, а также в работе и на сессиях Комитета по судоходству. На сессиях Комитета рассматривались такие вопросы, как структура и уровень фрахтовых ставок (в линейных конференциях), ограничение приема линейных компаний развивающихся стран в конференции, практика линейных конференций и т. д.

Критика развивающихся стран была направлена на международные линейные монополии — фрахтовые конференции, большое число которых обслуживало порты развивающихся стран и почти неограниченно во многих случаях проводило тарифную политику, ущемляющую интересы этих стран. Так, В. В. Петровский в работе [4] отмечает, что уже на первом заседании Комитета по судоходству ЮНКТАД, состоявшемся 18 – 23 ноября 1966 г., возникли принципиальные разногласия между «традиционными» морскими странами, представляющими, по сути дела, в линейном судоходстве интересы фрахтовых конференций, и развивающимися странами, представляющими главным образом интересы своей внешней торговли и национальных линий. Следует отметить, что согласно данным, приведенным в работе [16], первоначально Конференция ООН по торговле и развитию ЮНКТАД правовыми вопросами международного судоходства не занималась, и впервые эти вопросы были затронуты в ЮНКТАД на 4-й сессии Совета по торговле и развитию (сентябрь 1966 г.).

Позиция делегаций развивающихся стран в отношении конференций довольно четко определена в Отчёте специальной сессии Комитета по судоходству (18 – 25 июля 1966 г.), где в ст. 18 отмечается, что делегации развивающихся стран выразили неудовольствие практикой отдельных линейных конференций, которые отклонили обращения национальных линий развивающихся стран и даже используют свою практику в политике установления фрахтовых ставок для влияния на систему международной торговли. Определенная твердость, проявленная правительствами некоторых развивающихся стран: Бразилии, Аргентины, Индии, оказалась действенной и повлияла на политику конференций и последующее развитие торговли и флота этих стран.

В результате последовательной политики правительств развивающихся стран в области судоходства, в целом поддерживаемой СССР, в разное время появились такие известные судоходные компании, как Shipping Corporation of India (Индия), Islamic Republic of Iran Shipping Lines (Иран), Alianca (Бразилия), Transroll (Бразилия), ELMA (Аргентина), Ciamar (Аргентина) и многие другие. К сожалению, со временем поступательное движение в развитии флота развивающихся стран было остановлено. Средства массовой информации в то время отмечали, что на протяжении ста лет фрахтовые конференции были в состоянии диктовать условия в вопросах морского транспорта правительствам и грузовладельцам. Однако их абсолютная, строго рассчитанная сила ослабла под воздействием возросшего правительственного регулирования, под влиянием антитрестовского за-

конодательства, под усилившимся наступлением развивающихся стран и в результате возросших требований со стороны грузоотправителей.

Относительная стабильность, существовавшая в линейных конференциях примерно до 1955 г., была нарушена главным образом вследствие того, что развивающиеся страны, стараясь обеспечить для своих линейных компаний необходимый минимум грузов, применили «административный протекционизм» по отношению к собственному линейному судоходству и постарались ограничить долю «традиционного» линейного флота в перевозках своих экспортно-импортных грузов. Рост протекционистских тенденций в области линейного судоходства, подкрепленный, по сути, политикой правительства США, заставил традиционных конференциальных судовладельцев искать пути к консолидации своих рядов, изменению тактики деятельности конференций в целях сохранения своих позиций. Эти меры были настолько «чувствительными» для традиционных конференциальных судовладельцев, что они в ответ выдвинули обвинения против развивающихся стран в «дискриминации флагов» и потребовали от администрации своих стран защиты своих интересов вплоть до политического воздействия.

Следует также отметить, что, согласно данным источника [17], линейные и гражданские суда в течение продолжительного периода времени практически всегда регистрировались под своими национальными флагами. В результате большинство сторон, вовлеченных в морские линейные контейнерные перевозки к концу 60-х гг. XX в., имели серьезные причины для коренного изменения сложившейся ситуации. Однако их представление о характере изменений было принципиально разным. Несмотря на то, что согласно данным исследования [18], зачастую в целях защиты судоходства заключались двусторонние соглашения по пропорциональному распределению грузов между судами, принадлежащими соответствующим государствам, тем не менее некоторых проблем решить не удавалось. Большинство сторон приняло участие в обсуждении положений Конвенции ООН о Кодексе поведения линейных конференций. В дальнейшем не только Кодекс, но и непосредственно обсуждение основных его положений, оказали существенное влияние на развитие морских линейных перевозок.

Выводы

1. 50 – 60-е гг. XX в. оказали значительное влияние на развитие рынка морских перевозок в целом и линейных перевозок в частности. Гибель колониальных империй привела к нарушению привычной хозяйственной деятельности мирового морского торгового флота. На международной арене появился набирающий мощь флот социалистических стран, прежде всего СССР. Правительства развивающихся государств проявляли живой интерес к проблеме развития национального флота с целью сокращения транспортных расходов при осуществлении внешнеэкономической деятельности. Конференции были вынуждены искать защиту от «чрезмерной» протекции национальных компаний развивающихся стран со стороны правительств этих государств.

2. В развитых капиталистических странах качественно изменился уровень процесса консолидации капитала в отрасли морских перевозок, чаще всего, посредством правительств.

3. В середине XX в. появились противоречия между группами национальных перевозчиков, европейскими и азиатскими перевозчиками, с одной стороны, и североамериканскими перевозчиками и грузовладельцами, с другой стороны, которые в дальнейшем привели к длительным торговым войнам, ослабившим линейные конференции.

4. Появление чрезмерного увеличения провозной способности мирового тоннажа привело к превышению предложения над спросом на мировом фрахтовом рынке. Благоприятная конъюнктура на фрахтовом рынке вызвала приток капитала в судостроение и судоходство. Последовавшее за этим «перепроизводство» тоннажа вызвало понижательную конъюнктуру trampового рынка, а затем линейного.

5. В рассматриваемый период произошло ослабление зависимости грузовладельцев от конференций. Значительное влияние на рынок стали оказывать Советы и Ассоциации грузовладельцев, в результате чего появились элементы сотрудничества между конференциями и Советами

грузоотправителей. К 1960 гг. имело место кардинальное изменение политики конференций по отношению к грузоотправителям и их союзам.

6. Рассмотренные в статье события послужили толчком к следующему значительному шагу на пути урегулирования деятельности линейных конференций — процедурам по выработке Кодекса поведения конференций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чеботаренко А. Линейные конференции / А. Чеботаренко, С. Кленчу // Морское страхование. — 2012. — № 2. — С. 74–80.
2. Кириллова Е. В. Ретроспективный анализ становления и развития интеграционных объединений в линейном судоходстве / Е. В. Кириллова // Сборник научных трудов SWorld. — 2014. — № 1. — С. 114–219.
3. Конвенция о Кодексе поведения линейных конференций (Заключена в г. Женеве 06.04.1974) // Сборник международных договоров СССР. Вып. XXXIX. — М., 1985. — С. 94–121.
4. Петровский В. В. Морское линейное судоходство / В. В. Петровский. — М.: Транспорт, 1977. — 288 с.
5. Brodie P. Commercial Shipping Handbook, Second Edition / P. Brodie. — Informa Law, 2006. — 368 p.
6. The Impact of the Ocean Shipping Reform Act of 1998. — Federal Maritime Commission, 2001. — 87 p.
7. Буров В. И. Основные тенденции развития современного линейного судоходства / В. И. Буров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — 2015. — № 10-1. — С. 75–79.
8. Руководство по применению Конвенции о Кодексе поведения линейных конференций, подготовленное секретариатом ЮНКТАД. UNCTAD/ST/SHIP/1, публикация 26.01.1987. — 1987.
9. Иванова С. Е. Современные принципы формирования цены перевозки грузов в линейном судоходстве / С. Е. Иванова, Н. В. Митрофанова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 1. — С. 175а–180.
10. Sax E. Die Verkehrsmittel in Volks-und Staatswirtschaft / E. Sax. — Wien, 1879.
11. Левиков Г. А. Морской транспорт послевоенной Японии / Г. А. Левиков. — М.: Наука. Гл. ред. Восточной литературы, 1969. — 262 с.
12. Washington D. C. Review of dual-rate legislation, 1961–1964 / D. C. Washington // International Legal Materials. — 1964. — Vol. 3. — No. 6. — Pp. 1128–1132.
13. Ергин Д. Добыча: Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть / Д. Ергин. — М.: Альпина Паблишер, 2011. — 960 с.
14. Иванова Т. Н. Договор морской перевозки грузов в линейном судоходстве / Т. Н. Иванова // Транспортное право. — 2005. — № 4. — С. 13–15.
15. Вышнепольский С. А. Фрахтовая независимость СССР / С. А. Вышнепольский // Водный транспорт. — 1937. — № 11.
16. Доронина Н. Г. Отдельные виды обязательств в международном частном праве / Н. Г. Доронина, В. А. Егизаров, В. П. Звеков [и др.]; под ред. В. П. Звекова. — М.: Статут, 2008. — 603 с.
17. Арестова Ю. А. Современное состояние и проблемы морского флота России / Ю. А. Арестова, А. С. Погарская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 141–147.
18. Рамберг Я. Международные коммерческие транзакции / Я. Рамберг; пер. с англ. Н. Г. Вилковой. — 4-е изд. — М.: Инфотропик Медиа, 2011. — 896 с.

THE ACTIVITIES OF LINER CONFERENCES IN ADVANCE OF THE CODE OF CONDUCT FOR LINER CONFERENCES

In the article, the issues of development liner shipping and relationships with shippers Liner Conferences on the eve of the discussion in the UN Convention about the Code of conduct for liner conferences (further - the Code, 1974) are defined. Discussion of the provisions of the Code in the UN was preceded by significant changes in liner shipping market. The destruction of the colonial system led to violation of the established order of a century in the field of merchant shipping and undermined the power conferences. There freight owners and carriers, representing the developing countries. A significant scale consolidation has reached the capital, supported and regulated by governments of the capitalist states. Between national, transnational groups, shippers and carriers exacerbated contradictions. They have led to trade wars between states. It is determined that councils and cargo owners associations became the effective force on the sea liner steel market. Extensive changes are revealed, that

predetermined the start of the process of formulating the Code of Conduct for Liner Conferences. In addition, each of the contracting parties, before working on the Code, was pursuing its own goals.

Keywords: liner conference, shipping, ocean freight, freight market, the conference agreement.

REFERENCES

1. Chebotarenko, A., and S. Klenchu. "Linejnye konferencii." *Morskoe strahovanie* 2 (2012): 74–80.
2. Kirillova, E. V. "Retrospektivnyj analiz stanovlenija i razvitija integracionnyh obedinenij v linejnom sudohodstve." *Sb. nauchn. tr. SWorld* 1 (2014): 114–219.
3. "Konvencija o Kodekse povedenija linejnyh konferencij (Zakljucheng. Zheneve 06.04.1974)." *Sbornikmezhdunarodnyh dogovorov SSSR. Vyp. XXXIX. M., 1985: 94–121.*
4. Petrovskij, V.V. *Morskoe linejnoe sudohodstvo*. M.: Izdatelstvo «Transport», 1977.
5. Brodie, Peter. *Commercial Shipping Handbook, Second Edition*. Informa Law, 2006.
6. The Impact of the Ocean Shipping Reform Act of 1998. Federal Maritime Commission, 2001.
7. Burov, V.I. "Osnovnye tendencii razvitiya sovremennogo linejnogo sudohodstva." *Aktualnye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk* 10-1 (2015): 75–79.
8. Rukovodstvo po primeneniju Konvencii o Kodekse povedeniya linejnyh konfe-rencij, podgotovlennoe sekretariatom YUNKTAD. UNCTAD/ST/SHIP/1, publikacija 26.01.1987.
9. Ivanova, S.E., and N. V. Mitrofanova. "The modern principals of foundation of cost for carriage of goods in line shipping." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(2011):175a–180.
10. Sax, Emil. *Die Verkehrsmittel in Volks-und Staatswirtschaft*. Wien, 1879.
11. Levikov, G.A. *Morskoj transport poslevoennoj Yaponii*. M.: Nauka. Glavnaya re-dakcija vostochnoj literatury, 1969.
12. Washington, D. C. "Review of dual-rate legislation, 1961–1964." *International Legal Materials* 3.6 (1964): 1128–1132.
13. Ergin, Dehniel. *Dobycha: Vsemirnaya istoriya borby za neft, dengi i vlast*. M.: «Alpina Pablisher», 2011.
14. Ivanova, T.N. "Dogovor morskoy perevozki gruzov v linejnom sudohodstve." *Transportnoe pravo* 4(2005): 13–15.
15. Vyshnepolskij, S.A. "Frahtovaya nezavisimost SSSR." *Vodnyj transport* 11(1937).
16. Doronina, N. G., V. A. Egiazarov, V. P. Zvekov, et al. *Otdelnye vidy obyazatelstv v mezhdunarodnom chastnom prave*. M.: Statut, 2008.
17. Arestova, Yu.A., and A. S. Pogarskaya. "Modern condition (current status) and the problem of marine sea feet of Russia." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 141–147.
18. Ramberg, Ya. *Mezhdunarodnye kommercheskie tranzakcii. 4-e izd.* M.: Infotropik Media, 2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Русинов Игорь Александрович — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» RusinovIA@gumrf.ru
Гаврилова Ирина Александровна — кандидат экономических наук. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» Gavrilova.irina.a@gmail.com
Нелогов Андрей Георгиевич — аспирант. Научный руководитель: Русинов Игорь Александрович. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» andrey.nelogov@united-transport.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rusinov Igor Alexandrovich — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping RusinovIA@gumrf.ru
Gavrilova Irina Alexandrovna — PhD. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping gavrilova.irina.a@gmail.com
Nelogov Angrey Georgievich — postgraduate. Supervisor: Rusinov Igor Alexandrovich. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping andrey.nelogov@united-transport.ru

Статья поступила в редакцию 9 марта 2016 г.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 528.3

П. В. Томсон

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ШИРОТЫ В ФУНКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГЕОЦЕНТРИЧЕСКИХ КООРДИНАТ

Задачей данной статьи является разработка нового алгоритма вычисления геодезической широты в функции пространственных геоцентрических координат. В отличие от существующих способов определения геодезической широты, основанных на итеративных вычислениях или решении уравнения четвертой степени, предлагается способ непосредственного вычисления геодезической широты по предварительно рассчитанному приближенному её значению. Задача определения приближенного значения геодезической широты решается в плоскости меридиана данной точки с использованием соотношений углов и длин линий. Начальным аргументом для расчёта приближенного значения геодезической широты предлагается принять геоцентрическую широту. По приближенному значению геодезической широты рассчитывается приближенное значение радиуса кривизны первого вертикала. Таким образом, в иррациональной функции устраняется причина иррациональности, так как сложная эллиптическая функция искомой величины заменяется вещественным числом. Устранение иррациональности позволяет использовать любое из трёх исходных уравнений для непосредственного вычисления искомой величины — геодезической широты точки, положение которой задано пространственными геоцентрическими координатами.

Ключевые слова: пространственные прямоугольные координаты, геодезические координаты, геодезическая широта, геодезическая долгота, геодезическая высота, геоцентрическая широта, приведённая широта.

В НАСТОЯЩЕЕ время при преобразовании пространственных прямоугольных координат в геодезические приходится сталкиваться с определённой проблемой, связанной с вычислением геодезической широты. Из исходных уравнений, в которых пространственные прямоугольные координаты вычисляются в функции геодезической широты, геодезической долготы и геодезической высоты, вычислить в обратном порядке геодезическую широту можно только итеративным способом, т. е. последовательным приближением. Рассматриваемая задача имеет и прямое решение. В этом случае нужно задаться системой других уравнений, а именно, уравнением меридианного эллипса и уравнением нормали к меридианному эллипсу. Совместное решение этих уравнений приводит к одному уравнению четвертой степени, которое можно решить с помощью оптимизационного блока компьютерного приложения или, используя известные в математике алгоритмы, с последовательным переходом к кубическому уравнению и затем к квадратному уравнению. В данной работе предлагается алгоритм вычисления геодезической широты, исключающий необходимость итеративных вычислений или решения уравнений четвертой степени. В настоящее время решение этой задачи является весьма актуальным [1], так как постоянно возникает необходимость согласования положения определяемых точек в различных системах координат [2] – [4], таких как СК-42, СК-95, ПЗ-90, ПЗ-90.02, и в связи с введением, согласно Постановлению Правительства Российской Федерации [5] – [7], новых единых государственных систем координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11.

Если по заданным геодезическим координатам B , L и H вычисляются пространственные прямоугольные координаты X , Y , Z , то никаких затруднений не возникает, мы просто реализуем известные формулы (1):

$$\begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L; \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L; \\ Z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B, \end{aligned} \quad (1)$$

где N — радиус кривизны первого вертикала;
 e — первый эксцентриситет эллипсоида вращения.

При решении обратной задачи сталкиваемся с определённой проблемой, связанной с вычислением геодезической широты. Из уравнений (1) не удаётся выразить геодезическую широту в конечном виде, так как получаем иррациональное выражение. В этом случае геодезическую широту вычислить можно только итеративным способом. Для этого необходимо задать начальное приближенное значение геодезической широты, а затем реализовать итеративную формулу, каждый раз сравнивая заданное значение геодезической широты с вычисленным значением. В Государственных стандартах [8] – [10] приводится такой алгоритм, который требует выполнения до пяти итеративных циклов.

Задача вычисления геодезической широты имеет и прямое решение. Для его реализации необходимо задать два уравнения: уравнение меридианного эллипса и уравнение нормали к меридианному эллипсу, проведённой через заданную точку. Совместное решение этих уравнений приводит к одному уравнению четвёртой степени с одной неизвестной величиной. Такое уравнение просто решается с помощью оптимизационного блока компьютерного приложения или, не менее просто, по известным математическим алгоритмам последовательным переходом к кубическому и затем к квадратному уравнению.

Предложим формулу, позволяющую с максимальной геодезической точностью вычислять геодезическую широту, исключая при этом итеративные процессы и решение уравнений четвёртой степени. Допустим, что даны пространственные прямоугольные координаты (X, Y, Z) точки A . Необходимо вычислить геодезическую широту B точки A (рис. 1).

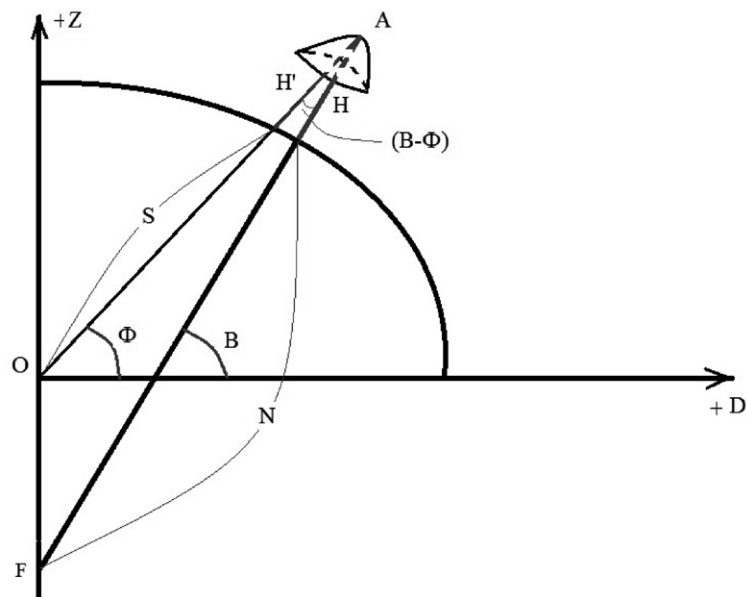


Рис. 1. Геодезическая и геоцентрическая широта точки:
 AF — нормаль к меридианному эллипсу, проходящая через точку A ;
 AO — линия, соединяющая точку A с центром эллипсоида O ;
 Φ — геоцентрическая широта точки A ; B — искомая геодезическая широта точки A ;
 H — геодезическая высота точки A ;
 H' — расстояние от эллипсоида до точки A по линии AO

Поставленная задача может быть решена с использованием схемы в плоскости меридиана заданной точки. Вычислим вспомогательные величины:

$$Q = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2};$$

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2}.$$

Выразим первое приближение геодезической широты B в функции геоцентрической широты Φ (рис. 2). Английский геодезист Боуринг решал такую задачу в функции приведённой широты [11]. Для этого вычислим геоцентрическую широту Φ по формуле

$$\Phi = \operatorname{arctg}\left(\frac{Z}{D}\right) \quad (2)$$

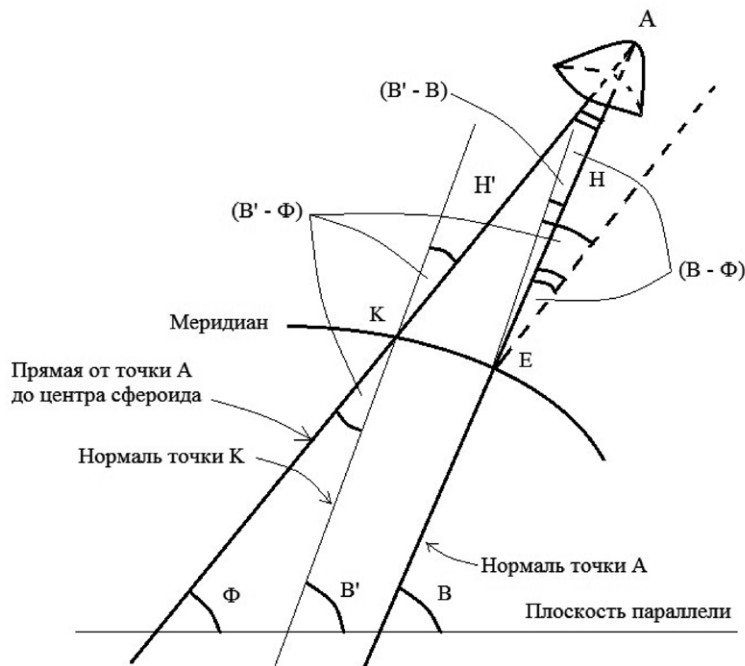


Рис. 2. Переход от геоцентрической широты к геодезической широте

и геодезическую широту B' точки K , лежащей на линии, соединяющей точку A с центром эллипсоида, по известной формуле

$$B' = \operatorname{arctg}\left[\frac{a^2}{b^2} \operatorname{tg}(\Phi)\right] = \operatorname{arctg}\left(\frac{a^2 Z}{b^2 D}\right). \quad (3)$$

Вычислим разность геодезической широты точки K и геоцентрической широты точки A (не превышает $11,5'$) по формуле

$$\Delta B = (B' - \Phi) = \operatorname{arctg}\left(\frac{a^2 Z}{b^2 D}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{Z}{D}\right). \quad (4)$$

Величина отрезка H' определится в виде

$$H' = Q - S, \quad (5)$$

где S — полурадиус меридианного эллипса, продолжение которого проходит через точку A .

Значение S можно вычислить по формуле

$$S = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^2(\Phi)}{a^2} + \frac{\sin^2(\Phi)}{b^2}}} = \frac{a(1-\alpha)}{\sqrt{1-e^2 \cdot \cos^2(\Phi)}} = \frac{b}{\sqrt{1-e^2 \cdot \cos^2(\Phi)}}, \quad (6)$$

где a и b — соответственно большая и малая полуоси меридианного эллипса (эллипсоида); α и e — полярное сжатие и первый эксцентриситет меридианного эллипса (эллипсоида).

Приближенное значение геодезической высоты H можно определить из фигуры AKE (рис. 2) в виде

$$H = H' \cdot \cos(\Delta B) = (Q - S) \cdot \cos(\Delta B). \quad (7)$$

Искомое значение геодезической широты вычислим по формуле

$$B = \Phi + \Delta B - \delta B = \Phi + (B' - \Phi) - \delta B = B' - \delta B, \quad (8)$$

где поправка δB может быть представлена как

$$\delta B \approx \frac{KE}{S} = \frac{(H \Delta B)}{S} = \frac{(Q - S) \cos(\Delta B) \Delta B}{S}. \quad (9)$$

Найденное приближенное значение геодезической широты B точки A подставляем в формулу первого вертикала

$$N \approx \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}. \quad (10)$$

Полученное число подставляем в любую из формул (1) и выражаем искомую геодезическую широту:

$$\begin{aligned} B &= \arccos \left[\frac{X}{(N + H) \cos(L)} \right]; \\ B &= \arccos \left[\frac{Y}{(N + H) \sin(L)} \right]; \\ B &= \arcsin \left[\frac{Z}{(N(1 - e^2) + H)} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Геодезическую долготу L находим по известной формуле

$$L = \arctg \left(\frac{Y}{X} \right). \quad (12)$$

Рассмотрим пример. Даны геодезические координаты точки A в референцной системе СК-42:

$$B = 52^\circ 00' 00,0000'' \text{ с.ш.};$$

$$L = 18^\circ 00' 00,0000'' \text{ в.д.};$$

$$H = 6400,000 \text{ м.}$$

Необходимо вычислить геодезическую широту в референцной системе ПЗ = 90.

По формулам (1) вычисляем пространственные прямоугольные координаты точки A в референцной системе СК-42, затем по формуле Гельмерта [12], с учётом известных параметров связи, — пространственные прямоугольные координаты точки A в референцной системе ПЗ-90:

$$X = 3746209,032 \text{ м};$$

$$Y = 1217078,469 \text{ м};$$

$$Z = 5007848,301 \text{ м.}$$

По полученным пространственным прямоугольным координатам вычисляем геодезическую широту точки A в референцной системе ПЗ-90, используя ГОСТ [8] – [10], алгоритм прямого решения и представленный ранее алгоритм. В результате получаем одно и то же значение широты:

$$B = 51^\circ 59' 58.6632'' \text{ с.ш.},$$

соответствующее заданной точности 0,0001''.

Выводы

1. Для вычисления геодезической широты может быть использована любая из формул (1) с учётом формулы (9). Разработанный алгоритм может служить альтернативой приведённым в ГОСТ [8] – [10] алгоритмам вычисления геодезической широты в функции пространственных геоцентрических прямоугольных координат. Алгоритм не требует итеративных вычислений и при однократном цикле вычислений даёт точный результат.
2. Применение предлагаемого алгоритма возможно при решении задачи преобразования геодезических координат из одной референцной системы в другую.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горобец В. П.* Результаты построения государственной геоцентрической системы координат Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «ГЛОНАСС» / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // Геодезия и картография. — 2012. — № 2. — С. 53–57.
2. *Дёгтева П. В.* Способ определения параметров связи референцных систем / П. В. Дёгтева, П. В. Томсон // Сборник статей научно-практической конференции «Морское образование: традиции, реалии и перспективы». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — Т. 2. — С. 51–55.
3. *Томсон П. В.* Определение параметров связи референцной системы МГС-84 (WGS-84) и референцной системы ГСК-2011 / П. В. Томсон // Сборник статей научно-практической конференции «Морское образование: традиции, реалии и перспективы». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — Т. 2. — С. 244–249.
4. *Томсон П. В.* Преобразование геодезических координат к плоским прямоугольным в одной координатной зоне проекции Гаусса — Крюгера для всей территории Российской Федерации / П. В. Томсон // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения». — СПб.: Политехника, 2015. — С. 303–305.
5. *Копылова Н. С.* Системы координат в картографии: настоящее и будущее / Н. С. Копылова, И. П. Стариков // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения». — СПб.: Политехника, 2015. — С. 299–303.
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат».
7. *Томсон П. В.* Об установлении единых государственных систем координат ГСК-2011, ПЗ-90.11 / П. В. Томсон // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2014. — С. 138–140.
8. ГОСТ Р 51794-2001. Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразования координат. — М.: Госстандарт России, 2001. — 12 с.
9. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. — М.: Стандартинформ, 2009. — 16 с.
10. ГОСТ 32453-2013. Межгосударственный стандарт. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. — М.: Стандартинформ, 2014.
11. *Bowring B. R.* Transformation from spatial to geographical coordinates / B. R. Bowring // Survey Review. — 1976. — Vol. 23. — Is. 181. — Pp. 323–327. DOI:10.1179/sre.1976.23.181.323.
12. *Томсон П. В.* Системы координат. Методы преобразования координат / П. В. Томсон, Г. В. Макаров. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2010. — 62 с.

DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR COMPUTING GEODATIC LATITUDE IN FUNCTION OF SPATIAL COORDINATES GEOCENTRIC WIDTH

My goal in writing this article is developing a new algorithm for computing geodetic latitude in function of spatial coordinates geocentric width. Unlike the existing ways of determining the latitude of Geodesy, based on iterative calculations or solving quartic equations, provides a direct calculation of geodetic latitude on pre-

determined close its value. To determine the approximate value of the geodetic latitude is solved in the plane of the meridian of the point of using angles and ratios of lengths of lines. The initial argument to calculate the approximate value of the geodetic latitude is invited to adopt the geocentric latitude. On the close value of geodetic latitude is calculated an approximate value of the radius of curvature of the first vertical. Thus, the irrational function eliminates the cause of irrationality as a complex elliptic function desired values is replaced by a real number. Elimination of irrationality allows you to use any of the three original equations to compute directly the desired magnitude is geodetic latitude of the point whose position is specified spatial geocentric coordinates.

Keywords: spatial rectangular coordinates, geodetic coordinates, geodetic latitude, geodetic longitude, geodesic height, geocentric latitude, reduced latitude.

REFERENCES

1. Gorobets, V. P., G. V. Demyanov, A. N. Mayorov, and G. G. Pobedinskiy. "Results of Russian Federation state geocentric coordinate system building in the framework of "GLONASS" federal target program." *Geodesy and Cartography* 2 (2012): 53–57.
2. Djogteva, P. V., and P. V. Tomson. "How to determine parameters of reference systems." *Sbornik statej nauchno-prakticheskoy konferencii «Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy»*. SPb.: Izd. GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015. Vol. 2. 51–55.
3. Tomson, P. V. "Determination of parameters of reference system MGS-84 (WGS-84) and reference system SSC-2011." *Sbornik statej nauchno-prakticheskoy konferencii «Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy»*. SPb.: Izd. GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015. Vol. 2. 244–249.
4. Tomson, P. V. "Preobrazovanie geodezicheskikh koordinat k ploskim prjamougolnym v odnoj koordinatnoj zone proekcii Gaussa-Krjugera dlja vsej territorii Rossijskoj Federacii." *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Geodezija, kartografija, geoinformatika i kadastry. Ot idei do vnedrenija»*. SPb.: Izd. Politehnika, 2015: 303–305.
5. Kopylova, N. S., and I. P. Starikov. "Sistemy koordinat v kartografii: nastojashhee i budushhee." *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Geodezija, kartografija, geoinformatika i kadastry. Ot idei do vnedrenija»*. SPb.: Izd. Politehnika, 2015: 299–303.
6. Russian Federation Government Resolution. 28 Dec. 2012. №1463 «O edinyh gosudarstvennyh sistemah koordinat».
7. Tomson, P. V. "On the establishment of the unified state system of coordinates SSC-2011 and PE-90.11." *Sbornik nauchnyh trudov professorsko-prepodavatelskogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2014: 138–140.
8. Russian Federation. GOST R 51794-2001. Apparatura radionavigacionnaja globalnoj navigacionnoj sputnikovoj sistemy i globalnoj sistemy pozicionirovaniya. Sistemy koordinat. Metody preobrazovaniya koordinat. M.: Gosstandart Rossii, 2001.
9. Russian Federation. GOST R 51794-2008. Globalnye navigacionnye sputnikovye sistemy. Sistemy koordinat. Metody preobrazovaniya koordinat opredeljaemyh toчек. M.: Standartinform, 2009.
10. Global navigation satellite system. Coordinate systems. Methods of transformations for coordinates of determined points. M.: Standartinform, 2014.
11. Bowring, B. R. "Transformation from spatial to geographical coordinates." *Survey Review* 23.181 (1976): 323–327. DOI:10.1179/sre.1976.23.181.323
12. Tomson, P. V., and G. V. Makarov. *Sistemy koordinat. Metody preobrazovaniya koordinat*. SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Томсон Петр Васильевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
peter-thomson@mail.ru, kaf_geo@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Thomson Peter Vasil'evich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
peter-thomson@mail.ru, kaf_geo@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2016 г.

ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННАЯ ДОБЫЧА СТРОИТЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В БАССЕЙНЕ РЕКИ АМУР

В мировой практике основная часть гидромеханизированной разработки полезных ископаемых приходится на добычу строительных горных пород. Подводная добыча осуществляется при освоении материковых и шельфовых месторождений, кроме того — ведется попутная добыча строительных материалов методами гидромеханизации при осуществлении дноуглубительных работ. В Хабаровском крае и Амурской области разрабатываются крупные русловые месторождения кварцевого песка и песчано-гравийной смеси. Благодаря низкой себестоимости разработки и удобному расположению месторождений, в Приамурье большая часть песка и песчано-гравийной смеси добывается из обводненных месторождений с помощью средств гидромеханизации. Основными техническими средствами, задействованными при разработке русловых месторождений, являются гидравлические земснаряды. В статье приводится перечень используемого при освоении месторождений добычного, перегрузочного и транспортного оборудования, перечисляются наиболее крупные предприятия, ведущие подводную добычу строительных горных пород, и разрабатываемые ими месторождения.

Ключевые слова: песок, гравий, земснаряд, экскаватор, черпание, производительность, баржа, плавкран, перегружатель, транспортировка.

Введение

В мировой практике основная часть гидромеханизированной разработки полезных ископаемых приходится на добычу строительных горных пород. Подводная (мокрая) добыча строительных горных пород осуществляется при освоении материковых и шельфовых месторождений, кроме того — ведется попутная добыча строительных материалов методами гидромеханизации при осуществлении дноуглубительных работ [1] – [3]. В промышленно развитых странах объемы подводной добычи весьма велики; так, в Японии на шельфовых месторождениях ежегодно добывается свыше 1 млрд т песка и гравия, данные материалы применяются как для строительства, так и для намыва прибрежных территорий. Крупные объемы подводной добычи строительных горных пород осуществляются в США, России, Великобритании, Австралии и других странах. С использованием средств гидромеханизации добываются такие строительные горные породы как песок, гравий, песчано-гравийная смесь, карбонатные породы и др. Обычно глубина подводной выемки полезных ископаемых не превышает 20 – 30 м, но в отдельных случаях может достигать 60 – 80 м и более [1], [2].

Гидромеханизированная добыча рыхлых строительных горных пород из русел судоходных рек, озер, водохранилищ с помощью земснарядов в сравнении с открытой разработкой имеет ряд преимуществ, а именно: при подводной добыче не требуется отчуждения значительных площадей сельскохозяйственных земель и лесных угодий под создание карьеров и отвалов, подъездных дорог и других объектов горного производства; разработка русловых месторождений, в основном, ведется с использованием высокопроизводительной техники непрерывного действия, в отличие от открытых горных работ, где преобладают машины циклического действия, имеющие относительно небольшую производительность, в связи с чем себестоимость гидромеханизированной добычи полезных ископаемых намного ниже; отсутствие проблем и затрат связанных с постоянной откачкой воды или даже остановкой работ в связи с притоком грунтовых вод (при углублении карьера) и при интенсивных осадках; возможность использования водного транспорта без проведения перегрузочных работ для доставки добытых строительных горных пород потребителям в случае их расположения вблизи водных коммуникаций [4], [5]. Благодаря этим преимуществам, а также наличию крупных русловых месторождений строительных материалов в Приамурье большая часть получаемого песка и песчано-гравийной смеси добывается из обводненных месторождений с помощью средств гидромеханизации. Кроме того, для организаций, имеющих на балансе

землечерпательное и дноуглубительное оборудование, а также транспортные речные суда, гидро-механизованная добыча строительных материалов и их доставка потребителям является крупным дополнительным источником получения средств, что особенно важно в связи с постепенным сокращением объемов речных перевозок по причине развития других видов транспорта, в частности автомобильного [6].

Оборудование для подводной добычи строительных горных пород

Существует большое количество оборудования для подводной добычи строительных горных пород, в целом оно подразделяется на две основных категории — земснаряды механического и гидравлического типов [2].

К механическим земснарядам относятся агрегаты с многочерпаковой рамой, грейферным оборудованием и экскаватор с обратной лопатой. Механические земснаряды черпают материал из-под воды ковшами, при этом земснаряды с грейферным и экскаваторным оборудованием являются машинами циклического действия. Механические земснаряды могут эффективно работать с материалами, содержащими крупные каменистые включения. Грейферные земснаряды (плавкраны) имеют относительно простую конструкцию, состоящую из стандартного поворотного крана на плавучей барже, они получили широкое распространение. Грейферный земснаряд предназначен для добычи песка и гравия и обеспечивает при необходимости возможность выемки полезных ископаемых с относительно больших глубин (до 80 м). Земснаряд в виде экскаватора с обратной лопатой обычно оснащается удлиненным рабочим оборудованием и устанавливается на понтоне или на берегу, глубина выемки не превышает 10 – 15 м [1]. Обратная лопата может разрабатывать как рыхлые (песок, гравий), так и плотные (мел, мергель, известняк) строительные горные породы. Для подводной добычи известняка и мела используются также цепные экскаваторы, установленные на берегу и перемещающиеся вдоль фронта работ на рельсовом ходу, при этом глубина черпания таких машин может превышать 40 м [1]. Подводная добыча плотных пород с помощью экскаваторов с обратной лопатой и цепных экскаваторов получила достаточно широкое распространение в странах Западной Европы (Бельгия, Дания, Франция, Германия).

Среди гидравлических земснарядов различают фрезерный, роторный и трюмный, а также земснаряд с плоским грунтоприемником [2]. В гидравлических земснарядах используются центробежные насосы для подачи вычерпываемой породы на поверхность. Земснаряды с плоским всасывающим грунтоприемником просты по конструкции, однако могут разрабатывать только рыхлые породы, такие земснаряды могут дополнительно оборудоваться гидроразрывом для заглубления всасывающей трубы. Фрезерные земснаряды, оборудованные специальным фрезерным рыхлителем, установленным на конце рамы с всасывающей трубой, могут производить выемку рыхлых и плотных строительных горных пород, они получили наибольшее распространение. Роторный земснаряд оснащен роторным рыхлителем, хорошо подходит для работы на породах с высоким содержанием глинистых компонентов. Все три рассмотренных гидравлических земснаряда устанавливаются на понтонах и перемещаются с помощью тросов и якорей, а поднятая на поверхность порода транспортируется на пришвартованную к земснаряду баржу или на берег по плавучему пульпопроводу. Трюмные земснаряды проектируются как самоходные суда, корпус которых включает трюм, они предназначены для углубления водных путей и добычи полезных ископаемых в море, при этом разгрузка добытых полезных ископаемых осуществляется в трюм земснаряда.

Подводная добыча строительных горных пород в Приамурье

В бассейне реки Амур подводная добыча строительных горных пород (кварцевый песок и песчано-гравийные смеси) осуществляется в Хабаровском крае и Амурской области [7], [8]. В Хабаровском крае из русловых месторождений добывается более 90 % песчано-гравийных материалов, в Амурской области — более 30 %. Кварцевые пески и песчано-гравийные смеси русловых месторождений Приамурья в основном, используются в транспортном строительстве для

устройства дорожного полотна, а также после отсева крупных фракций в качестве мелкого заполнителя в строительные растворы и в сухие строительные смеси [7].

Крупнейшими предприятиями Приамурья, ведущими разработку русловых месторождений песчано-гравийных материалов, являются ОАО «Хабаровский речной торговый порт», ООО «Амур-кварц» и ЗАО «Торговый порт Благовещенск». В Хабаровском крае подводная добыча строительных горных пород осуществляется тремя предприятиями на 10 русловых месторождениях, в Амурской области двумя предприятиями на двух месторождениях. Наиболее крупными по величине разведанных запасов и объемам добычи являются «Корсаковское», «Владимировское», «Индустриальное», «Хохлацкое» и «Кировское» русловые месторождения песчано-гравийных материалов.

Основными техническими средствами, задействованными при разработке русловых месторождений, являются гидравлические фрезерные земснаряды и земснаряды с плоским грунтоприемником. Также применяются механические земснаряды с грейферным оборудованием (плавучие краны). Для перевозки песчано-гравийных материалов до места выгрузки используются речные толкачи и баржи, реже — пульпопроводы (см. табл.). При выгрузке применяются гидравлические перегружатели, которые выгружают полезное ископаемое из барж на специальные карты намыва по установленным грунтопроводам, также разгрузка барж может осуществляться плавкранами. Разработка русловых месторождений на реке Амур осуществляется в течение навигационного периода длящегося с апреля по октябрь и равного примерно 180 дням. Большинство разрабатываемых русловых месторождений Приамурья располагаются в районе г. Хабаровска и г. Благовещенска и их пригородов.

Таблица

Техника, задействованная на разработке русловых месторождений песчано-гравийных материалов Приамурья

Назначение оборудования	Регион	
	Хабаровский край	Амурская область
Добычное и перегрузочное	Земснаряды «Портовый-12» и «Портовый-13» проекта Р-109 Земснаряд 3 ГДЭС «Амур» Земснаряд Гр УТ 2000/63 Плавкраны КПЛ-16-30 Плавкраны КПЛ-5-30 Гидравлические перегружатели проекта Р-68	Земснаряд «Портовый-9» проекта Р-010 Плавкран КПЛ-16/30 Плавкран ПТ-35 Плавкраны КПЛ-5-30
Транспортное	Речные толкачи РТ-600 проекта Р-1740 Баржи МБ-2500 Баржи МБ-1500 Пульпопровод	Речные толкачи РТ проекта 911В Буксиры-толкачи проекта 911Р и проекта 1741 Баржи МП-600 Баржи МП-1000

Предприятия, ведущие разработку русловых месторождений, используют как свою добычную, перегрузочную и транспортирующую речную технику, так и арендованную. Наибольшие объемы добычи приходятся на несамоходные гидравлические земснаряды проекта Р-109, которые имеют технологическую производительность по добыче песчано-гравийной смеси — 600 м³/ч (по добыче песка до 1000 м³/ч), максимальную глубину отработки месторождения — 12,5 м. Земснаряды проекта Р-109 оборудованы краном для монтажных работ, рамоподъемной лебедкой, носовыми и кормовой лебедками, грунтовым насосом, насосом гидрорыхлителя, рамой с всасывающим трубопроводом, гидрорыхлителем, грунтоприемником и другим оборудованием.

Перед началом добычных работ гидравлическим земснарядом проводятся подготовительные работы, заключающиеся в инструментальной разбивке и закреплении блоков месторождения по периодам разработки, разбивке створов и установке створных знаков. Углы блоков на воде

отмечаются бакенами, а створные плоскости, закрепляющие углы блоков и створы серий — деревянными столбами и вехами. Разработка месторождения земснарядом ведется траншейным способом. Вскрытие месторождения осуществляется проведением пионерной траншеи (прорези) для обеспечения доступа к полезному ископаемому и создания фронта добычных работ. Вскрышные породы обычно представлены тонкозернистым илисто-глинистым песком. Оработка участка месторождения производится одним добычным уступом. Добыча полезного ископаемого ведется на полную мощность залегания на максимально возможную для земснаряда глубину. Оработка ведется одной сплошной заходкой с перемещением земснаряда вверх по течению реки. Параметры добычного блока земснарядов проекта Р-109 с учетом углов откоса бортов выемки составляют: ширина по верху — 52 м, ширина по подошве — 11 м, длина — 200 м, высота — 12 м.

Земснаряд на добычном участке устанавливается на становой (носовой) и папильонажные (боковые) якоря с возможностью свободного перемещения судна по длине их тросов. К бортовым швартовочным устройствам земснаряда швартуют баржи. Забор песчано-гравийного материала производится через сосун грунтонасоса землесосного снаряда путем создания вакуума в месте забора. Поступающее через грунтонасос и трубопровод полезное ископаемое по боковым лоткам в состоянии пульпы выливается в ванную баржи. При заглублении рабочего органа земснаряда на проектную глубину происходит одновременное перемещение земснаряда к становой якорю вместе с пришвартованной баржей, нагружаемой полезным ископаемым. Пульпа, поступающая на баржу при загрузке, разделяется на воду, которая через донные выпуски бортов, кормовые и носовые окна сливается в водоем, и полезное ископаемое, оседающее в ванне баржи. Заполнение баржи ведется от кормы к носу, при этом, по мере загрузки баржи, земснаряд швартовыми тросами постепенно спускает баржу вдоль своего борта. Баржа грузится на осадку с учетом уровня воды в месте разработки и подходов к земснаряду.

На некоторых месторождениях добычные работы ведутся с использованием механических земснарядов с грейферным оборудованием (плавкранов) различных типоразмеров.

Транспортирование добытого полезного ископаемого осуществляется несамоходными баржами с использованием речных толкачей. Загружаются баржи поочередно с обоих бортов земснаряда без прекращения его работы при смене барж. С одного борта баржи загружаются только в случае недостаточных глубин с другого борта земснаряда или при работе в стесненных условиях. Грузоподъемность применяемых барж составляет 600, 1000, 1500 и 2500 т, осадка которых в порожнем состоянии составляет 0,41 – 0,47 м, а в груженом состоянии — 1,78 – 2,68 м.

Разгрузка барж осуществляется с помощью гидравлических перегружателей или кранами, оборудованными грейферными ковшами [9]. С карт намыва отгрузка песка потребителям в автотранспорт осуществляется с помощью погрузчиков или экскаваторов [10], на вспомогательных работах могут быть задействованы бульдозеры.

Выводы

На русловых месторождениях Хабаровского края, в сравнении с месторождениями Амурской области, задействовано более крупное добычное, перегрузочное и транспортное оборудование. Применение гидравлических земснарядов является эффективным и экономичным методом добычи и переработки больших объемов строительных горных пород. Разработка русловых месторождений кварцевого песка и песчано-гравийных смесей с использованием высокопроизводительной добычной и перегрузочной техники, а также водного транспорта позволяет обеспечить низкую себестоимость добычи полезных ископаемых (40 – 60 руб./т), а, следовательно и высокую рентабельность горного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткач С. М. Геотехнологии открытой добычи минерального сырья на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями / С. М. Ткач. — Новосибирск: Гео, 2013. — 307 с.

2. Шпанский О. В. Технология и комплексная механизация добычи нерудного сырья для производства строительных материалов / О. В. Шпанский, Ю. Д. Буянов. — М.: Недра, 1996. — 462 с.
3. Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. — СПб.: Глобус, 2012. — 140 с.
4. Чебан А. Ю. Комплекс для перегрузки насыпных строительных материалов в средства водного транспорта / А. Ю. Чебан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 43–47.
5. Филиппова Д. А. Баланс сточных вод при перегрузке песка гидромеханизированным способом / Д. А. Филиппова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 151–155.
6. Галин А. В. Внутренние водные пути России как часть транспортной инфраструктуры страны / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 120–124.
7. Чебан А. Ю. Структурный анализ технических средств, задействованных при добыче строительных горных пород на юге Дальневосточного региона / А. Ю. Чебан, Г. В. Секисов, Н. П. Хрунина // Горная промышленность. — 2013. — № 4 (110). — С. 26.
8. Чебан А. Ю. Анализ парка горных машин горнодобывающих предприятий Амурской области / А. Ю. Чебан, И. Ю. Рассказов, В. С. Литвинцев // Маркшейдерия и недропользование. — 2012. — № 2. — С. 41–50.
9. Адамов Е. И. Устройства, снижающие потери сыпучих грузов при перегрузке грейферными кранами / Е. И. Адамов, Н. С. Отделкин, С. Н. Сикарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 129–133.
10. Алексеев А. В. Анализ структуры современных складов сыпучих грузов / А. В. Алексеев // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 3. — С. 084–087.

HYDROMECHANIZED MINING CONSTRUCTION OF ROCKS IN THE BASIN OF RIVER AMUR

In world practice, the bulk of hydromechanized mining accounts for production of building rocks. Underwater mining is carried out during the development of the mainland and offshore fields, besides being a tail production of building materials jetting methods in carrying out dredging. In the Khabarovsk Territory and the Amur Region developed large river bed deposits of quartz sand and sand and gravel. Due to the low cost of development and the convenient location of deposits in the Amur region most of the sand and sand and gravel extracted from the flooded fields using jetting equipment. The main technical means involved in the development of fluvial deposits are hydraulic dredgers. The article lists the fields used in the development of mining, handling and transportation equipment, the largest listed companies, the leading underwater extraction of building rocks and mined deposits them.

Keywords: sand, gravel, dredge, excavator, scoop, performance, barge, floating crane, loader, transport.

REFERENCES

1. Tkach, S. M. *Geotehnologii otkrytoj dobychi mineralnogo syrja na mestorozhdenijah so slozhnymi gorno-geologicheskimi uslovijami*. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo «Geo», 2013.
2. Shpanskiy, Oleg Vasil'evich, and Ju. D. Bujanov. *Tehnologija i kompleksnaja mehanizacija dobychi nerudnogo syrja dlja proizvodstva stroitelnyh materialov*. M.: Nedra, 1996.
3. Dobycha nerudnyh stroitelnyh materialov v vodnyh obektah. Uchet rusloвого processa i rekomendacii po proektirovaniju i jekspluatcii ruslovyh karerov. SPb.: Izd-vo «Globus», 2012.
4. Cheban, Anton Jurievich. “Complex for handling of dry bulk construction materials in water transport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 43–47.
5. Filippova, D. A. “Balance scheme in sand cargo hydrotransport handling.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota ime-ni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 151–155.
6. Galin, Aleksandr Valentinovich. “Inland waterways of Russian Federation as part of country inland transport infrastructure.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(23) (2014): 120–124.

7. Cheban, Anton Jur'evich, G. V. Sekisov, and N. P. Khrunina. "Structural analysis of the machinery and equipment fleet for construction rock mining in the southern part of the Far East Region." *Mining Industry Journal* 4(110) (2013): 26.
8. Cheban, Anton Ju., I. Ju. Raskazov, and V. S. Litvintsev. "Analysis of the Amur region mining enterprises machinery park." *Mine surveying and subsurface use* 2 (2012): 41–50.
9. Adamov, Evgenij Ivanovich, N. S. Otdelkin, and S. N. Sikarev. "Device reduces losses in bulk cargo reloading grabbing crane." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 129–133.
10. Alekseev, Anton Vladimirovich. "Analysis of structure of modern warehouses of bulk cargo." *Science and Technology in Transport* 3 (2013): 84–87.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чебан Антон Юрьевич —
кандидат технических наук, доцент.
Институт горного дела ДВО РАН
chebanay@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Cheban Anton Yurievich —
PhD, associate professor.
Mining Institute
chebanay@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2016 г.

УДК 528.472; 528.475; 551.461

А. А. Елагин,
А. Л. Демидов

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ ПРИ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТАХ

В статье рассматриваются методы определения колебаний уровня моря, используемые при производстве гидрографических работ. Приведен детальный анализ каждого метода. Для каждого метода представлены аппаратные средства, используемые для определения колебаний уровня моря. Раскрываются особенности, преимущества и недостатки каждого метода. На основе проведенного анализа предложена классификация методов определения колебаний уровня моря при гидрографических работах. Обобщен новый материал по исследуемой теме с учетом последних достижений научно-технического прогресса. Предложенная классификация дает возможность выбора наиболее рационального способа определения колебаний уровня моря с учетом характеристик окружающей среды и технических возможностей при производстве работ. Выбор рационального метода приводит к уменьшению материальных затрат и получению данных, удовлетворяющих по точности и качеству действующим нормативным документам, что обладает огромной практической значимостью и актуальностью при планировании и производстве морских инженерных изысканий.

Ключевые слова: гидрографические съемки, ноль глубин, уровень моря, мареограф, спутниковая альтиметрия, кинематика реального времени.

Введение

При выполнении промерных работ глубины измеряются от поверхности воды, положение которой по высоте непрерывно изменяется. Поэтому для получения глубин в одной системе счета их приводят к определенному отсчетному горизонту воды. В связи с этим для производства промерных работ необходимо в исследуемой акватории организовать и провести уровенные наблюдения (установка постоянных и временных уровенных постов, их привязка и наблюдение за уровнем) для приведения измеряемых глубин к поверхности, принятой за отсчетную (ноль глубин). В настоящее время существуют несколько методов учета колебаний уровня моря, которые имеют

различный алгоритм производства наблюдений и расчета поправок в измеряемую глубину. В существующих научных публикациях не представлен детальный анализ методов определения колебаний уровня моря при производстве гидрографических работ, в особенности остаются не освещенными технологии, в основе которых лежат последние достижения научно-технического прогресса. В связи с этим создание классификации методов производства уровенных наблюдений позволит упростить выбор необходимого варианта реализации поставленной задачи при наименьших материальных затратах и получить данные, удовлетворяющие по точности и качеству нормативным документам [1] – [6].

Основная часть

В основе наиболее простого метода измерения колебаний уровня моря для введения поправок в измеренную глубину лежит использование уровенных постов *речного и свайного типа* [7]. Результаты измерений снимаются вручную и регистрируются в специальном журнале. В укрытом от волнения месте и при пологом профиле можно устраивать свайный пост, состоящий из ряда свай, устанавливаемых в створе перпендикулярно береговой линии. Наблюдения на свайном посту ведутся при помощи переносной рейки. В некоторых случаях, когда условия местности затрудняют организацию устройства свайного или речного поста, можно устраивать комбинированный (свайно-речный) уровенный пост. В зимних условиях при сплошном не дрейфующем ледовом покрове и отсутствии сильных течений можно устраивать уровенный пост на льду. Главным преимуществом данного метода является низкая стоимость организации уровенных наблюдений, а также простота в установке и использовании, а его недостатком является невозможность получения данных о приливах в реальном времени.

Развитие средств наблюдений шло в направлении создания самописцев для автоматической регистрации уровня моря. Наиболее простым автоматическим мареографом является *поплавковый мареограф*, принцип работы которого основан на преобразовании вертикальных перемещений поплавка в пропорциональные перемещения пера, записывающего их на диаграммной ленте (мареограмме). Преимуществом данного метода является высокая точность измерений, недостатком — использование успокоительного колодца.

Следующим, принципиально отличающимся от рассмотренного ранее, способом является метод определения колебаний уровня моря с помощью *гидростатических мареографов*, в конструкции которых заложен принцип хорошо известного барометра-анероида [8]. Чувствительные датчики таких приборов реагируют на колебания гидростатического давления, которые происходят при изменениях уровня моря. Существует два типа гидростатических датчиков. Первый тип основан на применении тензорезисторных датчиков, когда при изменении гидростатического давления происходит изменение емкостного сопротивления. Второй тип основан на применении кварцевых элементов, в которых при изменении давления происходит изменение резонансной частоты, после чего результирующий сигнал с частотой, пропорциональной приложенному давлению, передается по сигнальному кабелю в блок управления, где происходит его конвертация в единицы измерения давления. Переход от давления к линейным величинам осуществляется по следующей формуле [9]:

$$h = \frac{P - P_a}{\rho g}, \quad (1)$$

где P — измеренное давление; P_a — атмосферное давление; ρ — плотность воды; g — ускорение свободного падения.

Согласно данным источника [10], для более точной конвертации необходимо рассчитать ускорение свободного падения для места, где установлен мареограф, которое является функцией от широты φ . Гидростатические мареографы используются при производстве уровенных наблюдений как на берегу (стационарно), так и в условиях открытого моря. Датчики стационарных моделей мареографов устанавливаются в колодцах или на подводных конструкциях гидротехнических сооружений, а регистрирующая часть прибора размещается в будке водомерного поста. Примером

такого типа мареографов являются Valeport 740 Portable Water Level Recorder, разработанные английской компанией Valeport Ltd. В состав данного устройства входит датчик и регистрирующий блок со встроенными элементами электропитания, а также программного обеспечения TideLog, с помощью которого осуществляется программирование прибора и скачивание собранных данных. Опционально возможно подключение к радиомодему и радиоантенне для передачи данных об уровне моря удаленному пользователю.

В гидростатических донных мареографах измеряющие и регистрирующие устройства смонтированы в одном водонепроницаемом корпусе, и конструкция-связка, состоящая из мареографа, акустического размыкателя, груза и поплавков, устанавливается на дне. Примером таких регистраторов уровня моря могут служить гидростатические мареографы Valeport miniTide Self Recording Tide Gauge, RBR Duo, разработанные канадской компанией RBR Ltd, и гидростатический мареограф Seaguard WLR, разработанный норвежской компанией AANDERAA. Основные технические характеристики указанных мареографов приведены в табл. 1. Данные устройства спроектированы таким образом, чтобы они могли обеспечивать автономные непрерывные измерения колебаний уровня моря в течение длительного промежутка времени.

Таблица 1

Технические характеристики гидростатических мареографов

Название	Тип	Точность измерения давления, %	Диапазон глубин, м	Наличие датчика температуры
Valeport 740	Стационарный	±0,01	До 20	Нет
Valeport miniTide	Открытого моря	±0,01	До 6000	Нет
RBR Duo	Стационарный / Открытого моря	±0,05	До 50	Да
Seaguard WLR	Открытого моря	±0,02	До 6000	Да

Гидростатические мареографы широко используются при организации уровневых наблюдений, так как позволяют полностью автоматизировать данный процесс и получить высокоточные данные. Различные типы мареографов позволяют выполнять наблюдения за уровнем как в прибрежной зоне на водомерных постах, так и на большом удалении от берега. Однако необходима регистрация изменений атмосферного давления для корректной конвертации гидростатического давления столба воды в глубину моря.

Еще одним способом определения колебаний уровня моря является метод с использованием радиолокационных мареографов [11] – [13], работающих в К-диапазоне электромагнитных волн (диапазон частот сантиметровых волн 18 – 26,5 ГГц, что соответствует длине волн от 1,67 см до 1,13 см). Из-за особенностей этого диапазона (высокая степень атмосферного поглощения и небольшая длина волны), радиолокационные мареографы способны работать на малых расстояниях и производить измерения сверхвысокого разрешения. Одной из отличительных особенностей данных мареографов является то, что приемно-передающая антенна устройства устанавливается над водной поверхностью, что упрощает процесс установки прибора и уменьшает отрицательное влияние окружающей среды. По принципу действия радиолокационные мареографы разделяются на две категории: в основе первой лежит принцип *динамической рефлектометрии*, т. е. измерение времени прохождения сигнала от фазового центра антенны до поверхности воды и обратно (время прохождения сигнала пропорционально расстоянию). Принцип частотно-модулируемого сигнала непрерывного колебания используется в мареографах второй категории и вычисление высоты фазового центра антенны над водой, согласно данным источников [14], [15], производится исходя из измерения разности частот df между излученным и отраженным сигналами (рис. 1).

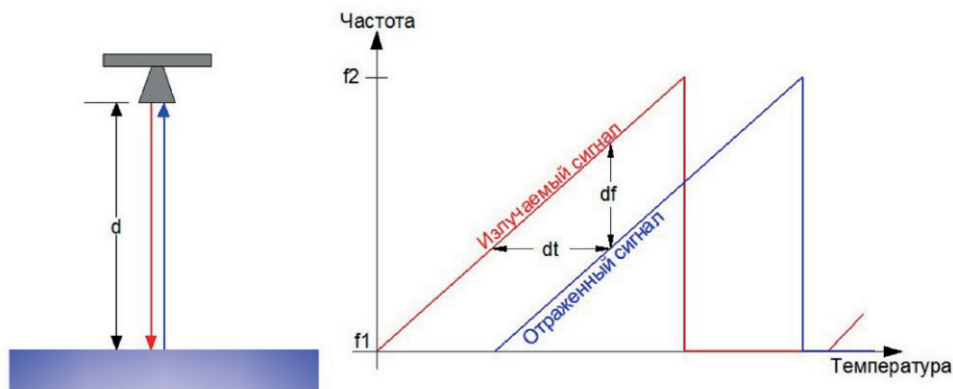


Рис. 1. Принцип работы радиолокационного мареографа, основанного на принципе частотно-модулируемого сигнала непрерывного колебания

Примером радиолокационных мареографов являются OTT RLS и CS 475-L, разработанные американскими компаниями OTT Hydromet и Campbell Scientific, а также VRS20 Radar Level Gauge компании Valeport Ltd. В табл. 2 приведены технические характеристики данных устройств.

Таблица 2

**Технические характеристики
радиолокационных мареографов**

Название	Частота	Диапазон, м	Точность	Ширина луча, град.
OTT RLS	24 ГГц (CE) 25 ГГц (FFC)	0,4 – 35	0,4 – 2,0 м – ±10 мм 2,0 – 30 м – ±3 мм 30 – 35 м – ±10 мм	12
CS 475-L	~26 ГГц	0,05 – 20	±5 мм	10
VRS20	25 ГГц	0,8 – 20	±10 мм	12

Благодаря высокой точности измерений и простоте установки данный метод получил широкое распространение при организации уровневых наблюдений на нефтегазопромысловых платформах и других гидротехнических сооружениях. В отличие от гидростатических мареографов, для конвертации данных нет необходимости учета поправок за давление морской воды и атмосферное давление, что упрощает их обработку и интерпретацию. Единственным недостатком является отсутствие возможности организации наблюдений в условиях открытого моря.

Рассмотрим также метод определения уровня моря, основанный на использовании акустических мареографов [9]. Приемо-передающая антенна располагается так же, как и у радиолокационных мареографов, над поверхностью воды и измеряет расстояние до её поверхности. Однако основой данного метода является использование акустических преобразователей, требующее дополнительных измерений скорости распространения звука в воздухе. В связи с этим на качество данных оказывает сильное влияние изменение температуры и влажности, что делает необходимым организацию дополнительных измерений этих параметров. Также для уменьшения влияния окружающей среды и калибровки датчика рекомендуется использование зондирующей трубки. Принцип действия акустического мареографа можно рассмотреть на примере акустического мареографа Aquatrak 5000, разработанного американской компанией Aquatrak Corporation (рис. 2).

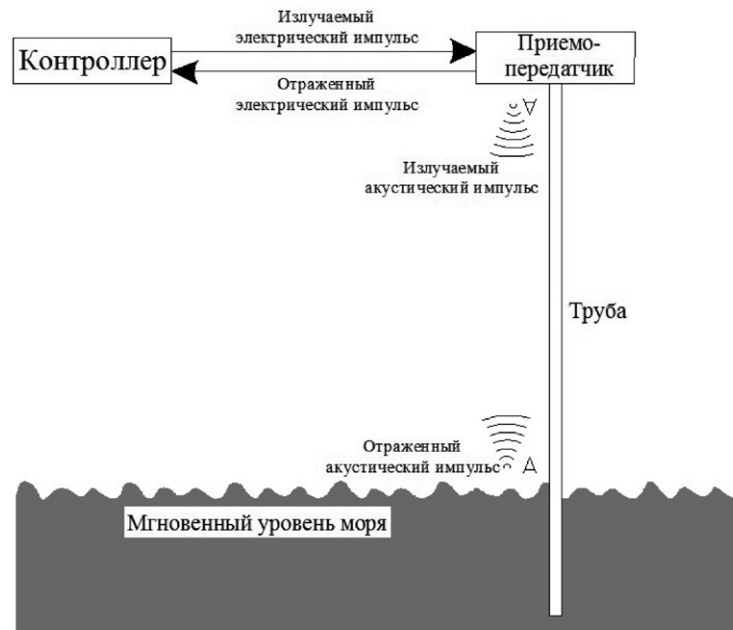


Рис. 2. Принцип работы акустического мареографа

Работа акустического мареографа основана на преобразовании электрической энергии от генератора импульсов в акустическую энергию, которая излучается и отражается от водной поверхности и регистрируется приемопередатчиком. Результирующая наблюдаемая величина временного интервала между моментами излучения и приема t используется для расчета высоты уровня моря по формуле, используемой в источнике [16]:

$$h = 0,5tc, \quad (2)$$

где c — скорость распространения звука в воздухе.

Акустические мареографы позволяют выполнять высокоточные уровенные измерения, однако имеют ряд недостатков относительно радиолокационных мареографов. К таким недостаткам следует отнести высокую подверженность влиянию изменений температуры и влажности воздуха на качество собираемых данных, а также отсутствие возможности организации наблюдений в условиях открытого моря.

В связи с развитием космических технологий у современной науки появилась возможность осуществлять дистанционное зондирование поверхности Земли с борта космического аппарата. Методика измерения расстояний от космического объекта до водной (земной) поверхности получила название спутниковой альтиметрии [8]. Спутниковая альтиметрия – один из важнейших активных методов мониторинга динамической топографии Мирового океана, позволяющий также проводить оценку высоты поверхностных волн и скорости приводного ветра. Данный метод изначально разрабатывался применительно к условиям открытого океана на расстоянии от берега не менее 20 км [17] – [19], где он обеспечивает заявленную точность измерений. Спутниковые альтиметрические наблюдения на регулярной основе проводятся с середины 1980-х гг. XX в. Среди них необходимо выделить следующие программы: серия российских спутников ГЕОИК, спутники Европейского космического агентства ERS-1, ERS-2, ENVISAT, а также спутники TOPEX / Poseidon (T/P) и Jason 1, 2, функционирующие в рамках международной программы мониторинга топографии поверхности Мирового океана. В последние годы активно обсуждаются возможности приложений спутниковой альтиметрии для мониторинга прибрежной зоны, внутренних водоемов и поверхности суши [20] – [22].

Основные программы спутниковой альтиметрии можно условно разделить на два типа. Первые направлены на решение геодезических задач: уточнение формы и высот геоида и гравита-

ционного поля Земли, вторые — на осуществление мониторинга изменчивости высоты морской поверхности. Для решения геодезических задач параметры орбиты подбираются таким образом, чтобы плотность покрытия подспутниковыми трассами (треками) Мирового океана была максимальной в пределах нескольких километров. Изомаршрутные программы предполагают повторяемость трасс в пределах ± 1 км через определенный период времени, позволяя реализовать режим повторных измерений по сетке равномерно расположенных по поверхности Земли треков. Изомаршрутные программы направлены, в первую очередь, на решение задач мониторинга пространственно-временной изменчивости высоты морской поверхности или уровня океана [23]. Геометрия измерений, проводимых альтиметром или радиовысотомером, приведена на рис. 3.

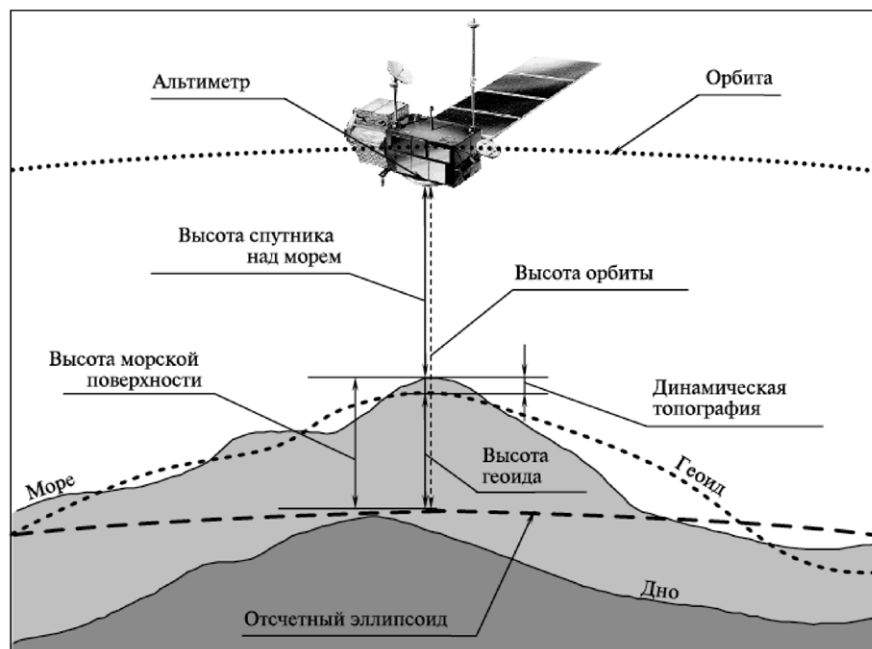


Рис. 3. Схема альтиметрических измерений

Поверхность, относительно которой определяются все остальные, называется отсчетным эллипсоидом, или эллипсоидом вращения, центр которого совпадает с центром тяжести Земли. Высота морской поверхности относительно отсчетного эллипсоида рассчитывается по формуле, приведенной в источнике [23]:

$$h_{\text{ВМП}} = h_{\text{ВОС}} - h_{\text{ВСМ}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{ВОС}}$ — высота орбиты спутника; $h_{\text{ВСМ}}$ — высота спутника над морем, полученная в результате обработки данных альтиметрии.

Помимо высоты морской поверхности для решения многих задач используются аномалии высоты морской поверхности:

$$h_{\text{АВМП}} = h_{\text{ВМП}} - h_{\text{СВМП}}, \quad (4)$$

где $h_{\text{СВМП}}$ — средняя высота морской поверхности (СВМП), которая рассчитывается, согласно данным источника [24], путем осреднения данных, полученных в результате альтиметрических измерений одного или нескольких спутников.

Уточнение высот геоида $h_{\text{ГЕОИД}}$ в открытом океане (или его формы) является одной из основных задач, решение которой является целью спутниковой альтиметрии. Отклонение морской поверхности от геоида в силу его определения (как невозмущенной поверхности океана) называется *динамической топографией*, или *уровнем океана*,

$$h_{\text{ДИН}} = h_{\text{ВМП}} - h_{\text{ГЕОИД}}. \quad (5)$$

Для более корректного расчета высоты морской поверхности необходим ряд поправок dh , куда входят поправки, связанные с прохождением радиосигнала через атмосферу, инструментальные поправки и состояние подстилающей поверхности:

$$h'_{\text{ВМП}} = h_{\text{ВОС}} - h_{\text{ВСМ}} - \sum dh. \quad (6)$$

Следует отметить, что точность измерения высоты спутника над морской поверхностью для альтиметрических спутников Т/Р и Jason 1, 2 в условиях открытого океана относительно отсчетного эллипсоида очень высока и достигает 1,7 см, а уровень океана относительно отсчетного эллипсоида, согласно данным источников [17], [19], [25], [26], определяется с точностью 3,4 см. Однако в связи с тем, что минимальная дискретность по времени производства измерений в определенной акватории, согласно данным источника [23], равна трем суткам, данный метод нельзя использовать в гидрографии, но он может быть использован для уточнения положения уровня океана, а также для проведения контроля качества уровенных измерений.

В связи развитием спутниковых радионавигационных систем второго поколения (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и т. д.), а также смежных отраслей науки в современной гидрографии появилась возможность учитывать поправки в измеряемую глубину за колебания уровня моря непосредственно во время производства промерных работ без установки уровенных постов. Это стало возможным благодаря развитию технологии *кинематики реального времени* (КРВ), которая обеспечивает геодезическую высоту мгновенной поверхности моря в точке измерения глубины с сантиметровой точностью, что, в свою очередь, согласно данным источников [27] – [29], делает возможным вычисление в реальном времени поправки за приведение измеренной глубины к выбранному нулю глубин.

В состав КРВ-системы входит референсная станция (база), расположенная на берегу в точке с точно определенными геодезическими координатами, и роверная станция, установленная на судне. Каждая станция включает ГНСС-приемники, а также устройства приема-передачи информации по радиоканалам (радиомодемы, радиоантенны). Ключевой особенностью КРВ является способность разрешения неоднозначности, т. е. определение целого количества циклов во время движения ровера, установленного на судне. Для реализации данного принципа используется комбинация данных L1 и L2. Ключевым условием стабильного функционирования КРВ-технологии является максимально одинаковое созвездие отслеживаемых навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ). Данное условие достигается при удалении референцной и роверной станций до 20 км. Согласно данным источника [27], на расстоянии между базой и ровером до 15 км плановые координаты могут быть определены с точностью 5 – 8 см, а геодезическая высота до 10 см может быть определена на уровне 95 % доверительной вероятности. Данный метод позиционирования и определения поправок за колебания уровня моря получил широкое распространение при производстве прибрежных инженерных изысканий и обладает высокой точностью определения плановых и высотных геодезических координат. Однако КРВ-технология не может быть использована при выполнении гидрографических работ в условиях открытого моря при удалении от берега свыше 20 км.

В статье [30] приведена теоретическая основа метода определения уровня моря при помощи спутниковых радионавигационных систем второго поколения без применения КРВ-технологии, суть которого состоит в расчете исправленной геодезической (эллипсоидальной) высоты антенны за углы крена и дифферента, а также за динамическое проседание судна, после чего становится возможным переход от высоты антенны к фактическому уровню моря с последующим приведением к выбранному нулю глубин. Для реализации данного метода необходимо использовать спутниковый приемник с подключенным дифференциальным сервисом, компенсатор качки и датчик осадки, установленные на судне. Главной отличительной особенностью данного метода от кинематики реального времени является то, что он может быть использован на любом удалении от берега, однако так же, как и для КРВ-технологии, для его практической реализации необходимо определение расстояния между используемым эллипсоидом и выбранным нулем глубин (для пе-

рехода от геодезической высоты к нулю глубин). В связи с тем, что в основе данного метода лежит определение геодезической высоты, ему можно присвоить название *спутниково-геодезический*.

Результаты проведенного исследования

Таким образом, по результатам проведенного исследования все устройства, предназначенные для организации уровенных наблюдений по методике производства измерений, можно классифицировать следующим образом:

- речечно-свайные;
- поплавковые;
- гидростатические;
- радиолокационные;
- акустические;
- спутниковая альтиметрия;
- кинематика реального времени (КРВ);
- спутниково-геодезические.

Результаты проведенного исследования сведены в табл. 3, где отражены преимущества и недостатки каждого рассмотренного метода, а также приведены точностные характеристики и районы применения.

Таблица 3

Анализ методов определения колебаний уровня моря

Название	Применение	Точность	Преимущества	Недостатки
Речечно-свайный	Порты, причалы, в условиях отсутствия гидротехнической инфраструктуры	± 1 см	Низкая стоимость, простота в установке и обслуживании поста	Ручная регистрация измерений
Поплавковый	Порты, причалы, в условиях отсутствия гидротехнической инфраструктуры	± 1 см	Относительно низкая стоимость, простота в установке и обслуживании	Невозможность использования при больших уклонах рельефа дна
Гидростатический	Повсеместно	$\pm 0,05$ % от верхней границы диапазона измерения	Высокая точность, относительно низкая стоимость, возможность использования в условиях открытого моря	Организация параллельных наблюдений за атмосферным давлением и плотностью воды
Радиолокационный	Порты, причалы и др. гидротехнические сооружения	± 1 см	Высокая точность измерений, простота установки, независимость от изменений окружающей среды	Невозможность использования в условиях открытого моря
Акустический	Порты, причалы и другие гидротехнические сооружения	± 1 см	Высокая точность	Организация параллельных измерений температуры и влажности воздуха, сложность в установке

Таблица 3
(Окончание)

Спутниковая альтиметрия	Теоретически повсеместно	±5 см	Повсеместное использование, высокая точность	Большая временная производства измерений (один раз в трое суток)
КРВ	Прибрежные районы	±5 см	Моментальное приведение измеренной глубины к отсчетной поверхности	Ограниченный радиус применения (<20 км)
Спутниково-геодезический	Теоретически повсеместно	±10 см	Относительная малая стоимость, повсеместность использования, поправки за уровень могут быть вычислены моментально	Необходимость расчета ортометрической высоты (расстояние между отсчетным уровнем и эллипсоидом)

Выводы

1. При планировании и производстве инженерных изысканий исполнитель работ получит возможность использовать сводную таблицу характеристик методов определения колебаний уровня моря и рекомендации по их применению.

2. Предлагаемый анализ позволит выбрать наиболее рациональный метод определения колебаний уровня моря с учетом физико-географических особенностей окружающей среды и технических возможностей при производстве работ.

3. Выбор данного метода приведет к уменьшению материальных затрат и получению данных, удовлетворяющих по точности и качеству действующим нормативным документам, что имеет большую практическую значимость и актуальность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 31.74.04-2002. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним. — М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 2002. — 88 с.

2. СП 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. — М.: ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России, 2004. — 88 с.

3. Правила гидрографической службы № 5. Ч. 1. Составление и издание морских карт. — СПб.: УНиО МО РФ, 2009. — 306 с.

4. Правила гидрографической службы № 4. Съёмка рельефа дна судоходных морских и речных акваторий. — СПб.: УНиО МО РФ, 2014. — 314 с.

5. IHO manual on Hydrography. Publication C-13, 1-st Edition. — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011. — 511 p.

6. Guidelines for The Use of Multibeam Echosounders for Offshore Surveys. — London: International Marine Contractors Association, 2015. — S 003. — Rev.2. — 54 p.

7. Testut L. The sea level at port-aux-Francais, Kergulen Island, from 1949 to the present / L. Testut, G. Wöppelmann, B. Simon, P. Téchiné // Ocean Dynamics. — 2006. — Vol. 56. — Is. 5. — Pp. 464–472. DOI: 10.1007/s10236-005-0056-8.

8. Деев М. Г. Уровень как индикатор изменений состояния Мирового океана / М. Г. Деев // География. Первое сентября. — 2010 г. — № 6.

9. Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume IV. — 2006. — 80 p.
10. Воротилина М. И. Влияние ускорения свободного падения на выбор места строительства космодрома / М. И. Воротилина // *Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире*. — 2015. — № 12-1. — С. 161–164.
11. Woodworth P. L. A one year comparison of radar and bubbler tide gauges at Liverpool / P. L. Woodworth, D. E. Smith // *International hydrographic review*. — 2003. — Vol. 4. — № 3. — Pp. 2–9.
12. Miguez B. M. The use of Radar tide gauges to measure variations in sea level along the French coast / B. M. Miguez, R. L. Roy, G. Wöppelmann // *Journal of coastal research*. — 2008. — Vol. 24. — Is. 4A. — Pp. 61–68. DOI: <http://dx.doi.org/10.2112/06-0787.1>
13. Blasi C. J. A new technology for the measurement of the sea level and the sea state / C. J. Blasi // *Environmental geology*. — 2009. — Vol. 57. — Is. 2. — Pp. 331–336.
14. Poffa N. Evolution instrumentale des maregraphes du reseau / N. Poffa, S. Enet, J. C. Kerinec // *JNGCGC*. — 2012. — № 66. — Pp. 611–618.
15. Simon B. La maree oceanique cotiere / B. Simon. — Paris: Institut Oceanographique, 2007. — 433 p.
16. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-История, 2010. — 348 с.
17. Троицкая Ю. И. Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов / Ю. И. Троицкая, Г. В. Рыбушкина, И. А. Соустова [и др.] // *Водные ресурсы*. — 2012. — Т. 39. — № 2. — С. 169.
18. Chelton D. B. Satellite Altimetry. In: *Satellite Altimetry and the Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications* / D. B. Chelton, J. Ries, B. Haines, L. L. Fu, P. Callahan. — San Diego: Academic Press, 2001. — Pp. 1–131.
19. OSTM/Jason-2 Products Handbook. Iss: 1.9. — 2015. — 65 p.
20. Deng X. A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: Application to ERS-2 around Australia / X. Deng, W. E. Featherstone // *Journal of Geophysical Research*. — 2006. — Vol. 111. — Is. C6. — Pp. 1–16. DOI: [10.1029/2005JC003039](https://doi.org/10.1029/2005JC003039)
21. Legresy B. ENVISAT radar altimeter measurements over continental surfaces and ice caps using the ICE-2 retracking algorithm / B. Legresy, F. Papa, F. Remy, G. Vinay, M. van den Bosch, O. Z. Zanife // *Remote Sensing of Environment*. — 2005. — Vol. 95. — Is. 2. — Pp. 150–163. DOI: [10.1016/j.rse.2004.11.018](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.018)
22. Papa F. Use of the Topex-Poseidon dualfrequency radar altimeter over land surfaces / F. Papa, B. Legrésy, F. Rémy // *Remote Sensing of Environment*. — 2003. — Vol. 87. — № 2–3. — Pp. 136–147. DOI: [10.1016/S0034-4257\(03\)00136-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00136-6)
23. Лаврова О. Ю. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова, А. Г. Костяной, С. А. Лебедев [и др.]. — М.: Институт космических исследований РАН, 2011. — 472 с.
24. Лебедев С. А. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря / С. А. Лебедев, А. Г. Костяной. — М.: РАН Институт океанологии им. П. П. Ширшова, 2005. — 353 с.
25. Лебедев С. А. Динамика Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии / С. А. Лебедев // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2015. — Т. 12. — № 4. — С. 72–85.
26. Kouraev A. V. Satellite Altimetry Application in the Caspian Sea, Coastal Altimetry / A. V. Kouraev, J.-F. Crétaux, S. A. Lebedev, A. G. Kostianoy, A. I. Ginzburg, N. A. Sheremet, R. Mamedov, E. A. Zakharova, L. Roblou, F. Lyard, S. Calmant, M. Bergé-Nguyen // *Coastal altimetry*. — Springer Berlin Heidelberg, 2011. — Pp. 331–366. DOI: [10.1007/978-3-642-12796-0_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_13).
27. Фирсов Ю. Г. Методы использования спутниковой аппаратуры, реализующей режим кинематики реального времени (РТК) для определения поправок за уровень / Ю. Г. Фирсов // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2007. — № 1. — С. 21–26.
28. Sander P. RTK tide basic / P. Sander // *HYDRO International*. — 2003. — Vol. 7. — № 10. — Pp. 26–29.
29. Фирсов Ю. Г. Определение высоты уровня моря в геоцентрической системе с использованием высокоточного спутникового сервиса С-NAV / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов // *Геодезия и гидрография*. — 2007. — № 6. — С. 55–64.
30. Волков В. В. Определение уровня моря при помощи спутниковых радионавигационных систем второго поколения / В. В. Волков, А. А. Елагин, А. Л. Демидов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 6 (34). — С. 93–99.

ANALIS OF SEA LEVEL DETERMINATION METHODS USED HYDROGRAPHIC SURVEYS

In this article discusses methods for determining the sea level fluctuations, used in the production hydrographic survey. Given in-depth analysis of each method. Presented hardware for each method is used for sea level determination. features, advantages and disadvantages of each method are given. Based on the analysis methods for determining of sea level fluctuations is proposed the classification during hydrographic surveys. Generalizes new material on investigated theme, taking into account the latest achievements of scientific and technical progress. This classification makes it possible to select the most efficient method for determining the fluctuations of sea level, taking into account characteristics of the environment and technical capabilities in the production of works. The choice of a rational method reduces material costs and receive data satisfying the accuracy and quality of the existing regulations, which has enormous practical importance and relevance in the planning and production of marine engineering surveys.

Keywords: hydrographic survey, chart datum, sea level, tide gauge, satellite altimetry, real time kinematic.

REFERENCE

1. Russian Federation. RD 31.74.04-200. Tehnologiya promernyh rabot pri proizvodstve dnouglubitelnyh rabot i pri kontrole glubin dlya bezopasnosti plavaniya sudov v morskikh portah i na podhodax k nim. M.: Ministerstvo transporta Rossiiskoy Federatsii, 2002.
2. Russian Federation. Set of regulations SP 11-114-2004. Inzhenernye izyskaniya na kontinentalnom shelfe dlya stroitelstva morskikh neftegazopromyslovyh sooryzheniy. M.: FGUP PNIIS Glavstroj Rossii, 2004.
3. *Pravila gidrograficheskoy sluzhby №5. Sostavlenie i izdanie morskikh kart. Ch.1.* SPb.: UNIO MO RF, 2009.
4. *Pravila gidrograficheskoy sluzhby №4. Sjemka reljefa sudohodnyh morskikh I rechnyh akvatorij.* SPb.: UNIO MO RF, 2014.
5. *IHO manual on Hydrography.* Publication C-13, 1-st Edition. Monaco: IHO, 2011.
6. *Guidelines for The Use of Multibeam Echosounders for Offshore Surveys.* London: International Marine Contractors Association, 2015. S 003. Rev.2.
7. Testut, L., G. Wöppelmann, B. Simon, and P. Téchiné. "The sea level at port-aux-Francais, Kergulen Island, from 1949 to the present." *Ocean Dynamics* 56.5 (2006): 464–472. DOI: 10.1007/s10236-005-0056-8
8. Deev, M. G. "Uroven kak indikator izmenenij sostoyaniya mirovogo okeana." *Geografiya. Pervoye sentyabrya* 6 (2010).
9. *Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume IV.* 2006.
10. Vorotilina, M. I. "Influence of acceleration of gravity on the choice of the site of the spaceport." *Fundamentalnye I prikladnye issledovaniya v sovremennom mire* 12-1 (2015): 161–164.
11. Woodworth, P. L., and D. E. Smith. "A one year comparison of radar and bubbler tide gauges at Liverpool." *International hydrographic review* 4.3 (2003): 2–9.
12. Mígueza, Belén Martín, Ronan Le Royb, and Guy Wöppelmann. "The use of Radar tide gauges to measure variations in sea level along the French coast." *Journal of coastal research* 24.4A (2008): 61–68. DOI: <http://dx.doi.org/10.2112/06-0787.1>.
13. Blasi, C. J. "A new technology for the measurement of the sea level and the sea state." *Environmental geology* 57.2 (2009): 331–336.
14. Poffa, Noé, Séverine Enet, and Jean-Claude Kerinec. "Evolution instrumentale des maregraphes du reseau." *JNGCGC* 66 (2012): 611–618.
15. Simon, B. *La maree oceanique cotiere.* Paris: Institut Oceanographique, 2007.
16. Firsov, Yu. G. *Osnovy gidroakystiki I ispolzovaniya gidrograficheskikh sonarov.* SPb: Nestor-istoriya, 2010.
17. Troitskaya, Y. I., G. V. Rybushkina, I. A. Soustova, G. N. Balandina, S. A. Lebedev, A. G. Kostyanoi, A. A. Panyutin and L. V. Filina. "Satellite altimetry of inland water bodies." *Water Resources* 39.2 (2012): 184–199.
18. Chelton D. B., J. Ries, B. Haines, L. L. Fu, and P. Callahan. *Satellite Altimetry. In: Satellite Altimetry and the Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications.* San Diego: Academic Press, 2001.

19. *OSTM/Jason-2 Products Handbook. Iss: 1.9.* 2015.
20. Deng, X., and W. E. Featherston. "A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: Application to ERS-2 around Australia." *Journal of Geophysical Research* 111.C6 (2006): 1–16.
21. Legresy, B., F. Papa, F. Remy, G. Vinay, M. van den Bosch, and O. Z. Zanife. "ENVISAT radar altimeter measurements over continental surfaces and ice caps using the ICE-2 retracking algorithm." *Remote Sensing of Environment* 95.2 (2005): 150–163. DOI:10.1016/j.rse.2004.11.018.
22. Papa, F., B. Legrésy, and F. Rémy. "Use of the Topex-Poseidon dualfrequency radar altimeter over land surfaces." *Remote Sensing of Environment* 87.2–3 (2003): 136–147. DOI:10.1016/S0034-4257(03)00136-6
23. Lavrova, O. Ju., A. G. Kostjanov, S. A. Lebedev, M. I. Mitjagina, A. I. Ginzburg, and N. A. Sheremet. *Kompleksnyj sputnikovyj monitoring morej Rossii.* M.: Institut kosmicheskikh issledovanij RAN, 2011.
24. Lebedev, S. A. *Sputnikovaya altimetriya Kaspijskogo mora.* M.: RAN Institut okeanologii im. P.P. Shirshova, 2005.
25. Lebedev, S. A. "The dynamics of the Caspian Sea based on satellite altimetry data." *Current problems in remote sensing of the Earth from space* 12.4 (2015): 72–85.
26. Kouraev, A. V., J.-F. Crétaux, S. A. Lebedev, A. G. Kostianov, A. I. Ginzburg, N. A. Sheremet, R. Mamedov, E. A. Zakharova, L. Roblou, F. Lyard, S. Calmant, and M. Bergé-Nguyen. "Satellite Altimetry Application in the Caspian Sea." *Coastal altimetry.* Springer Berlin Heidelberg, 2011: 331–366. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_13.
27. Firsov, Yuriy Geogievich. "Metody ispolzovaniya sputnikovoi apparatury, realizuiushchei rezhim kinematiki realnogo vremeni (RTK) dlia opredeleniya popravok za uroven moria." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (2007): 21–26.
28. Sander, P. "RTK tide basic." *HYDRO International* 7.10 (2003): 26–29.
29. Firsov, Yu. G., and M. V. Ivanov. "Definition of sea level altitude in geocentric system using C-NAV high-accuracy satellite service." *Geodiziya i kartografiya* 6 (2007): 55–64.
30. Volkov, V. V., A. A. Elagin, and A. L. Demidov. "Sea level determination by global navigation satellite system". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 93–99.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Елагин Антон Анатольевич — аспирант.
 Научный руководитель:
Шматков Владимир Антонович —
 доктор технических наук, профессор.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С.О.Макарова»
elagintony@gmail.com
Демидов Александр Леонидович — аспирант.
 Научный руководитель:
Шматков Владимир Антонович.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
alexandrdemidov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Elagin Anton Anatolievich — postgraduate.
 Supervisor:
Shmatkov Vladimir Antonovich —
 Dr. of Technical Sciences, professor.
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
elagintony@gmail.com
Demidov Aleksandr Leonidovich — postgraduate.
 Supervisor:
Shmatkov Vladimir Antonovich.
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
alexandrdemidov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2016 г.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 629.113

О. К. Безюков,
Е. В. Макарьев,
Махфуд Маад Мохаммед

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА СУДОВОГО ВЫСОКООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ЕГО ОХЛАЖДЕНИИ ВОДОЙ И АНТИФРИЗОМ

В статье рассмотрены эрозионно-коррозионные разрушения поверхностей систем охлаждения дизельных двигателей и возможности их снижения применением в качестве теплоносителя антифризов и повышения их температуры. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния воды, антифриза и их температуры на составляющие теплового баланса высокооборотного судового дизеля. Показано, что использование антифриза с температурой 90 °С не нарушает работу судового дизель-генератора ЗЧ12/14,5, ранее рассчитанного на использование в качестве теплоносителя воды при 70 °С. Установлено, что при переходе от охлаждения водой при 70 °С к охлаждению антифризом при 90 °С происходит перераспределение составляющих теплового баланса, небольшое увеличение эффективного КПД дизельного двигателя и сокращение расхода топлива, особенно заметное при нагрузках 25 и 50 %. При этом не были отмечены какие-либо негативные явления, что открывает перспективы повышения температуры антифриза до 100 — 110 °С без проведения существенных конструктивных изменений судовых высокооборотных ДВС.

Ключевые слова: судовые высокооборотные ДВС, эрозионно-коррозионные разрушения, жесткость рабочего процесса, вибрации, охлаждающие жидкости, антифризы, тепловой баланс, ультразвуковые теплорасходомеры.



ФЕДЕРАЛЬНАЯ целевая программа «Национальная технологическая база» и входящая в ее состав подпрограмма «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011 – 2015 гг. дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» предусматривают необходимость производства в России современных высокооборотных дизельных двигателей мощностью от 400 до 4000 кВт, обладающих высокой экономичностью и ресурсными показателями, лимитируемыми в настоящее время, прежде всего, теплонапряженным состоянием и повышенной виброактивностью. От этих негативных факторов в значительной мере зависят тепловые потери, интенсивность образования трещин и эрозионно-коррозионных разрушений омываемых водой поверхностей втулок и блоков цилиндров. В результате в четырехтактных высокооборотных двигателях при наработке 30 – 50 % от расчетной выбраковываются от 20 до 50 % втулок цилиндров из-за повреждений боковых поверхностей в результате эрозии, порождаемой вибрационной кавитацией [1].

Согласно феноменологической модели, предложенной в [2] и [3], процессы эрозионно-коррозионных разрушений в зарубашечном пространстве дизелей зависят от свойств и параметров как деталей остова (амплитуды и частоты колебаний, эрозионной и коррозионной стойкости материалов, напряженно-деформированного и теплового состояния), охлаждающей жидкости (плотности, скорости звука, вязкости, поверхностного натяжения, состава и количества растворенных примесей и ингибиторов, температуры и давления), так и свойств границ раздела поверхностей и жидкости (шероховатости и смачиваемости). Интенсивность образования кавитационных пузырьков (разрывов сплошности) определяет сочетание звукового давления, порождаемого вибрирующими поверхностями (динамический фактор), статического давления охлаждающей жидкости (статический фактор) и давления насыщения (тепловой фактор). Возника-

ющие под воздействием теплового потока и динамических импульсов, вызванных колебаниями втулок, паровые пузырьки в охлаждающей жидкости быстро растут, их объем увеличивается в тысячи раз в течение сотых долей секунды. Достигнув некоторого размера, определяемого интенсивностью теплового потока, свойствами и параметрами охлаждающей жидкости, пузырьки или отрываются от поверхности и, попадая в недогретое ядро потока, полностью или частично конденсируются, или в результате повышения звукового давления захлопываются, вызывая эрозионные разрушения втулок и блоков цилиндров высокооборотных судовых ДВС. Все это увеличивает трудоемкость обслуживания и стоимость ремонта дизелей, непроизводительные простои судов. Поэтому эксплуатация двигателей без применения специальных методов водоподготовки запрещена заводами-изготовителями.

Предпринимаемые в настоящее время усилия по созданию в России форсированных высокооборотных судовых дизельных двигателей типа 12ЧН15/17,5 (ПАО «Звезда») и 12ЧН18/21,5 (ОАО «УДМЗ»), предназначенных, в том числе, для применения на судах, предусматривают необходимость снижения их виброактивности, совершенствование охлаждающих жидкостей, свойства и параметры которых должны обеспечивать минимальные коррозионно-эрозионные разрушения втулок и блоков цилиндров, что, в свою очередь, благоприятно скажется на технико-эксплуатационных и ресурсных показателях двигателей в целом.

В [4] показано, что одним из основных факторов, который в значительной степени определяет силовую нагрузку и уровень вибраций деталей цилиндро-поршневой группы и шатунов высокооборотных ДВС, является рабочий процесс ДВС, сопровождающийся высокой скоростью нарастания давления в камере сгорания. В [5] приведена индикаторная диаграмма дизельного двигателя 12ЧН18/20 (М482) (рис. 1), иллюстрирующая указанные нестационарные газодинамические процессы.

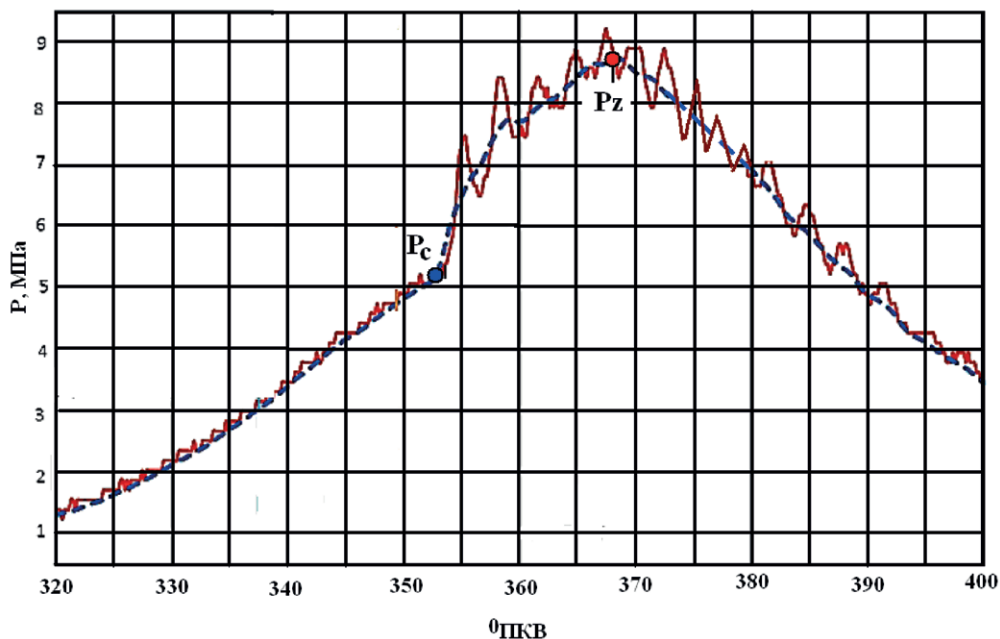


Рис. 1. Индикаторная диаграмма рабочего процесса судового дизельного двигателя 12ЧН18/20 (М482) на номинальном режиме ($g_e = 216$ г/кВт·ч; среднее индикаторное давление 1,184 МПа; степень повышения давления $\lambda = P_z / P_c = 1,67$; скорость нарастания давления $(dp / d\varphi)_{\max} = 0,71$ МПа / град. ПКВ); — — измеренное давление; - - - - давление, осредненное по времени

Рассмотрим возможности снижения интенсивности вибраций и эрозионно-коррозионных разрушений в судовых высокооборотных дизельных двигателях за счет воздействия на параметры рабочего процесса.

В [6] приведен критерий подобия, позволяющий анализировать влияние газодинамических процессов при сгорании топлива и жесткости конструктивных элементов на интенсивность вибрации (виброперемещение) наружной поверхности δ втулки цилиндра,

$$\delta = \text{const} \cdot \sigma \cdot p_z \cdot \frac{S \cdot D^2}{Z_{vt}}$$

где $\sigma = g_i / g_{ц} = f(\tau_i)$ — показатель динамичности цикла, являющийся функцией периода задержки самовоспламенения топлива; g_i — масса топлива, поступившего в цилиндр двигателя за период задержки воспламенения; $g_{ц}$ — цикловая подача топлива; p_z — максимальное давление цикла; S — ход поршня; D — диаметр втулки цилиндра; Z_{vt} — цилиндрическую жесткость втулки цилиндра.

Указанная зависимость показывает, что одним из эффективных методов уменьшения вибраций ДВС является снижение жесткости рабочего процесса и максимального давления цикла, зависящих, прежде всего, от периода задержки самовоспламенения топлива.

Расчет периода задержки самовоспламенения может быть выполнен по формуле, приведенной в [7]:

$$\tau_i = 0,44 \cdot p_c^{-1,19} \cdot e^{4650/T_c},$$

где p_c и T_c — давление температура в конце процесса сжатия.

Он показывает, что увеличение температуры T_c на 50 °С сокращает период более чем на 50 %. Это приводит к увеличению подогрева воздуха в процессе наполнения и сжатия, что обеспечивает более быструю подготовку топлива к воспламенению и существенное сокращение периода задержки самовоспламенения [8], и, следовательно, к уменьшению количества топлива, впрыскиваемого в цилиндры за этот период. Это приводит к снижению показателя динамичности цикла $\sigma = g_i / g_{ц}$, максимальной скорости нарастания давления в цилиндре $(dp/d\varphi)_{\max}$, характеризующей жесткость рабочего процесса, и виброактивность дизельного двигателя.

Повышение температуры воздушного заряда может быть обеспечено:

- снижением интенсивности охлаждения наддувочного воздуха;
- увеличением температуры охлаждающей жидкости;
- применением присадок к охлаждающей воде, снижающих интенсивность теплообмена в зарубашечном пространстве.

Как показано в [9], подогрев наддувочного воздуха, снижая жесткость рабочего процесса и виброактивность ДВС, оказывает только косвенное влияние на эрозионно-коррозионные процессы в зарубашечном пространстве дизельных двигателей. Поэтому более предпочтительными являются методы, оказывающие влияние как на жесткость рабочего процесса, так и непосредственно на интенсивность эрозионно-коррозионных процессов в зарубашечном пространстве за счет изменения параметров и теплофизических свойств охлаждающих жидкостей.

В [10] показано, что повышение температуры охлаждающей воды, в том числе переход к высокотемпературному охлаждению, требует изменения давления и конструкции системы охлаждения, исключая объемное кипение в зарубашечном пространстве и крышках цилиндров, что может быть реализовано только вновь разрабатываемых двигателях или при их существенной модернизации. Поэтому более предпочтительным является поддержание высоких температур в системе охлаждения путем применения теплоносителей с высокой температурой кипения. К их числу относятся антифризы, обладающие рядом положительных качеств: низкой температурой замерзания (от –30 до –70 °С) и высокими температурами кипения (110 °С) и воспламенения, высокой теплоемкостью и теплопроводностью, малой вязкостью особенно при низких температурах [11] – [13]. Сравнительная характеристика физико-химических свойств воды, моноэтиленгликоля и антифриза марки А-40 приведена в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства воды, моноэтиленгликоля и антифриза марки А-40

Показатель	Физико-химические свойства			
	Вода	Моно-этиленгликоль	Отношение моно-этиленгликоль / вода	Антифриз марки А-40
Молярная масса	18,01	62,07	3,45	–
Плотность при 20 °С, кг/м ³	998,2	1113	1,115	1070
Температура замерзания, К	273	261	1,046	233
Температуры кипения при 0,1 МПа, °С	100	197,7	1,977	108
Теплоемкость при 20 °С, кДж/(кг×°С)	4,184	2,422	0,579	3,29
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,60	0,265	0,438	0,406
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	1,0	19 – 20	19 – 20	1,28
Теплота испарения, кДж/кг	2,258	0,800	0,354	–
Коэффициент объемного расширения (0 – 100 °С)	0,00046	0,00062	1,348	–

Источник: Тенденции в производстве охлаждающих жидкостей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=342 (дата обращения: 03.03.2016).

Пониженная температура замерзания позволяет использовать антифризы для охлаждения ДВС судов, работающих на ледоколах, нефтегазодобывающих платформах, судах снабжения платформ, без риска промерзания внутреннего контура охлаждения в случае аварийных и нештатных ситуаций. Антифризы следует применять для охлаждения дизельных двигателей, конвертируемых из автотракторных и изначально спроектированных под низкотемпературные жидкости [14]. Кроме того, антифризы могут найти применение и в качестве теплоносителей в системах утилизации теплоты охлаждающей жидкости, наддувочного воздуха и отработавших газов. Наиболее часто на практике применяются антифризы, содержащие воду и этиленгликоль в объеме 50 – 65 %, т. е. содержание присадки (этиленгликоля) превышает концентрацию в охлаждающих жидкостях традиционных ингибиторов эрозионно-коррозионных разрушений и накипеобразования на один-два порядка, что не может не отразиться на протекающих в системе охлаждения теплофизических процессах. Кроме того, в состав товарных антифризов входят антипенные присадки и ингибиторы коррозии на основе солей органических и неорганических кислот.

Как показали исследования динамики и эрозионного воздействия кавитационных полостей, приведенные в [15] и [16], увеличение плотности и особенно вязкости антифриза по сравнению с водой способно существенно уменьшить кавитационную активность и снизить интенсивность эрозионных разрушений вибрирующих поверхностей систем охлаждения. В результате скорость эрозионных разрушений чугунных образцов при испытаниях на магнитострикторе в воде и в антифризе при 95 °С сокращается более чем в два раза [16]. Следует отметить, что, несмотря на ряд очевидных преимуществ, антифриз всё же имеет и ряд недостатков, по сравнению с пресной водой. Свойства воды как теплоносителя существенно лучше, чем у антифриза, что обуславливает уменьшение теплоотвода при его использовании.

В связи с изложенным, широкое внедрение антифризов в качестве теплоносителя внутреннего контура охлаждения судовых ДВС, не предназначенных изначально для использования низкотемпературных жидкостей, требует проведения специальных испытаний. К ним, прежде всего, относятся исследования:

- возможности перевода дизеля с охлаждения водой на охлаждение антифризом при одновременном повышении температуры до 90 °С;
- изменения составляющих теплового баланса.

Для выполнения этих исследований на кафедре теории и конструкции судовых ДВС ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова на базе судового дизель-генератора 3VD14,5/12-2SRW (3Ч12/14,5) создан специальный экспериментальный стенд [17], основные параметры которого представлены в табл. 2. Его отличительными особенностями являются использование комплекса современных измерительных приборов (ультразвуковые теплорасходомеры, цифровой анемометр, пирометр, промышленный ноутбук), способных работать в условиях повышенных вибраций и температур теплоносителей. На этом стенде были проведены испытания указанного дизельного двигателя по нагрузочной характеристике при его охлаждении пресной водой при температуре 70 ± 2 °С и антифризом при температуре 90 ± 2 °С.

Таблица 2

Основные характеристики дизель-генератора 3VD14,5/12-2SRW

Дизель-генератор 3VD14,5/12-2SRW	
Мощность, кВт	29
Напряжение, В	115
Год производства	1987
Предприятие-производитель	VEB, Лейпциг, Германия
Дизельный двигатель	
Модель	SKL, 3VD14,5/12-2
Тип	Четырехтактный, с водяным охлаждением, без наддува
Номинальная мощность, кВт	38
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Диаметр цилиндра, мм	120
Ход поршня, мм	145
Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	240
Генератор	
Модель	VEB GBCa 225 SIL-900S
Ток, А	278

Полученные результаты были обработаны и представлены в виде графиков (рис. 2 – 3).

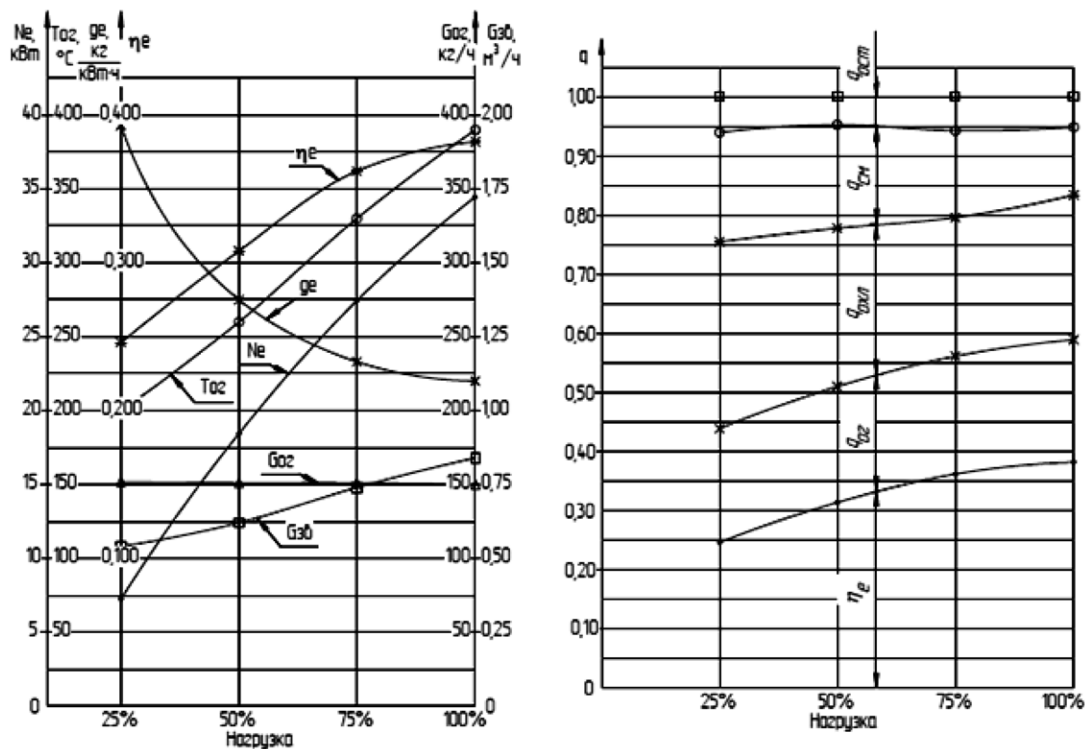


Рис. 2. Нагрузочная характеристика и тепловой баланс дизеля, охлаждаемого водой при 70 °С

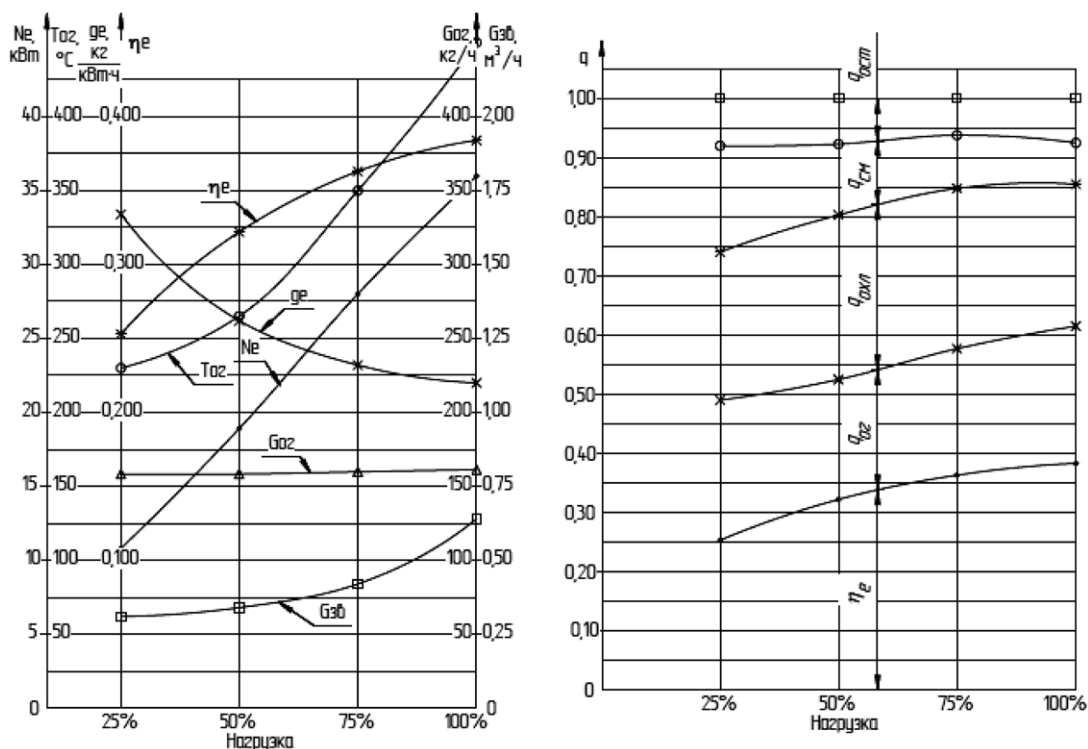


Рис. 3. Нагрузочная характеристика и тепловой баланс дизеля, охлаждаемого антифризом при 90 °С

Результаты эксперимента подтвердили, что при работе с паспортными параметрами двигателя ($T_{\text{охл}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{м}} = 70 - 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и при использовании в качестве хладагента пресной воды с увеличением нагрузки от 25 % до номинальной происходит увеличение эффективного КПД (от 24 до 37 %). Потери в охлаждающую воду при изменении нагрузки от 25 до 75 % уменьшаются с 32 до 23 %, но при нагрузке 100 % возрастают до 28 %, что, по-видимому, связано с началом поверхностного кипения недогретой воды в верхней части зарубашечного пространства и крышках цилиндров, сопровождающееся ростом интенсивности теплоотдачи. Относительные тепловые потери с отработавшими газами примерно постоянны (около 20 %) во всем диапазоне исследованных нагрузок. При использовании антифриза при 90 °С при росте нагрузки от 25 % до номинального режима происходит увеличение эффективного КПД (от 25,3 % до 38,3 %). Относительные тепловые потери с отработавшими газами также примерно постоянны (около 23 %), однако выше, чем при охлаждении водой при 70 °С. Как абсолютные, так и относительные тепловые потери в антифриз существенно уменьшаются во всем исследованном диапазоне нагрузок.

В результате проведенных испытаний установлено, что при переходе от охлаждения водой при 70 °С к охлаждению антифризом при 90 °С происходит перераспределение составляющих теплового баланса, небольшое увеличение эффективного КПД дизельного двигателя и сокращение расхода топлива, особенно заметное при нагрузках 25 и 50 %. Таким образом, испытания в течение 18 час. показали, что использование антифриза с температурой 90 °С не нарушает работу судового дизель-генератора 3VD14,5/12-2SRW (1500 мин⁻¹), ранее рассчитанного на использование в качестве теплоносителя воды при 70 °С. При этом не были отмечены какие-либо негативные явления (нехарактерный шум, нестабильность частоты вращения, повышение вибраций или температуры смазочного масла). Это открывает перспективы повышения температуры антифриза до 100 — 110 °С без проведения существенных конструктивных изменений судовых высокооборотных ДВС.

Следует особо отметить, что затраты на антифриз как средства оптимизации теплового состояния и уменьшения кавитационно-коррозионных разрушений и накипеобразования на один

двигатель мощностью до 1000 кВт на год пренебрежимо малы — много меньше затрат на топливо, расходуемое СЭУ в течение одних суток. Тем более его применение сопровождается сокращением расхода топлива при нагрузках около 50 % — наиболее характерных для дизель-генераторов. В то же время охлаждающие жидкости, содержащие этиленгликоли, потенциально могут существенно сократить эрозионно-коррозионные разрушения блоков, втулок и крышек цилиндров, наиболее массивных, дорогих и трудоемких в ремонте деталей остова дизельных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Валишин А. Г.* Оценка ресурса цилиндрических втулок ДВС при вибрационной кавитации / А. Г. Валишин // Двигателестроение. — 2008. — № 1. — С. 20–23.
2. *Безюков О. К.* Основы комплексного совершенствования охлаждения судовых дизелей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / О. К. Безюков. — СПб.: СПГУВК, 1996. — 48 с.
3. *Безюков О. К.* Основные положения феноменологической модели эрозионно-коррозионных разрушения втулок цилиндров судовых дизелей / О. К. Безюков // Материалы докладов Всероссийской научно-методической конференции. — СПб.: СПГУВК, 1994. — С. 117–119.
4. *Ионас Я. Б.* К вопросу о влиянии скорости нарастания давления в камере сгорания на силовую нагрузку деталей поршневого двигателя / Я. Б. Ионас // Научные труды НАТИ. — 1970. — № 204. — С. 46–58.
5. *Иванченко А. А.* Выбор математической модели для описания характеристики выгорания топлива при доводке судового дизеля с аккумуляторной топливной системой / А. А. Иванченко, В. А. Макуров, И. А. Щенников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 31–37.
6. *Афанасьева О. В.* Безразмерные комплексы для оценки виброактивности судовых дизелей / О. В. Афанасьева, О. К. Безюков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 4. — С. 56–59.
7. *Кавтарадзе Р. З.* Теория поршневых двигателей. Специальные главы / Р. З. Кавтарадзе. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 720 с.
8. *Тимофеев В. Н.* Температурный режим двигателей внутреннего сгорания и его регулирование / В. Н. Тимофеев. — Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2008. — 358 с.
9. *Лудченко Н. И.* Энергетическая эффективность подогрева наддувочного воздуха для ДВС типа ЧН21/21 / Н. И. Лудченко, О. Л. Мартемьянов, В. О. Сайданов [и др.] // Двигателестроение. — 2010. — № 3. — С. 22–25.
10. *Разуваев А. В.* Повышение эффективности систем высокотемпературного охлаждения двигателей / А. В. Разуваев // Двигателестроение. — 1999. — № 2. — С. 9–11.
11. ГОСТ 28084-89. Жидкости охлаждающие низкотемпературные. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2007. — 15 с.
12. *Кириченко Н. Б.* Автомобильные эксплуатационные материалы / Н. Б. Кириченко. — М.: Академия, 2014. — 208 с.
13. *Ратнов А. Е.* Улучшение эксплуатационных показателей транспортных двигателей путем совершенствования свойств охлаждающих жидкостей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Е. Ратнов. — СПб.: СПбГПУ, 2005. — 21 с.
14. *Иванов И. Е.* Системы охлаждения поршневых ДВС: монография / И. Е. Иванов, М. Г. Шатров, Т. Ю. Кричевская. — М.: Изд-во МАДИ, 2015. — 168 с.
15. *Безюков О. К.* Исследование динамики и эрозионного воздействия кавитационных полостей / О. К. Безюков, Ю. А. Гривнин, С. П. Зубрилов, В. А. Ларин // Межвузовский сб. «Взаимодействие тел с границами раздела сплошной среды». — Чебоксары, 1985. — С. 21–29.
16. *Красножон П. А.* Оценка влияния экологически безопасных охлаждающих жидкостей на надежность автомобильных двигателей / П. А. Красножон, В. А. Янчеленко // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 35–37.
17. *Макарьев Е. В.* Стенд для теплосбалансных испытаний судовых ДВС / Е. В. Макарьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 12–19.

RESEARCH HEAT BALANCE MARINE HIGH-SPEED DIESEL ENGINES, COOLED WATER AND ANTIFREEZE

The article describes the erosion-corrosion fracture surface cooling systems of diesel engines and the possibility of reducing the use as a coolant and antifreeze to increase their temperature. The results of experimental studies of the influence of water, antifreeze and temperature on the components of the heat balance of high-speed marine diesel.

It is shown that the use of antifreeze with a temperature of 90 °C does not disrupt marine diesel generator 3CH12 / 14.5, previously designed for use as a coolant water at 70 °C. It was established that during the transition from the cooling water at 70 °C cooling antifreeze at 90 °C redistribution of heat balance, a slight increase in the effective efficiency of the diesel engine and reduce fuel consumption, especially noticeable at loads of 25 and 50%.

This has not been observed any negative phenomena, which opens prospects for raising the coolant temperature to 100 – 110 °C without substantial design changes of high-speed marine engine.

Keywords: marine internal combustion engines, coolants, antifreeze, heat balance, ultrasonic heat meters.

REFERENCES

1. Valishin, A. G. "Evaluation of Resource of Engines Cylinder Liner Exposed to Vibratory Cavitation." *Dvigatelsestroyeniye* 1 (2008): 20–23.
2. Bezyukov, O. K. *Osnovy kompleksnogo sovershenstvovaniya ohlazhdeniya sudovyh dizelej*: Abstract of Dr. diss. (Tech.). SPb.: SPGUVK, 1996.
3. Bezjukov, O. K. "Osnovnye polozheniya fenomenologicheskoy modeli jerozionno-korroziionnyh razrusheniya vtukov cilindrov sudovyh dizelej." *Materialy dokladov Vserossijskoj nauchno-metodicheskoy konferencii*. SPb.: SPGUVK, 1994: 117–119.
4. Ionas, Ja. B. "K voprosu o vlijanii skorosti narastaniya davleniya v kamere sgoraniya na silovuju nagruzku detalej porshnevoego dvigatelja." *Nauch. tr. NATI* 204 (1970): 46–58.
5. Ivanchenko, A. A., V. A. Makurov, and I. A. Shennikov. "Selecting a mathematical model for describing characteristics of the fuel burnup at operational development marine diesel engine with common rail system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 31–37.
6. Afanasjeva, O. V., and O. K. Bezukov. "Dimensionless groups for the vibroactivity estimation of the ship diesel engines." *Jekspluatsija morskogo transporta* 4 (2008): 56–59.
7. Kavtaradze, R. Z. *Teorija porshnevnyh dvigatelej. Specialnye glavy*. M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2008.
8. Timofeev, V. N. *Temperaturnyj rezhim dvigatelej vnutrennego sgoraniya i ego regulirovanie*. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2008.
9. Ludchenko, N. I., O. L. Martemyanov, V. O. Saidanov, V. V. Bozhko, L. A. Stolyarchuk, A. V. Razuvaev. "Air Preheating to Boost Energy Efficiency of CH21/21 Engines." *Dvigatelsestroyeniye* 3 (2010): 22–25.
10. Razuvaev, A. V. "Povyshenie jeffektivnosti sistem vysokotemperaturnogo ohlazhdeniya dvigatelej." *Dvigatelsestroenie* 2 (1999): 9–11.
11. Russian Federation. GOST 28084-89. Low-freezing cooling Fluid. General specifications. M.: Standartinform, 2007.
12. Kirichenko, N. B. *Avtomobilnye jekspluatsionnye materialy*. M.: Akademija, 2014.
13. Ratnov, A. E. *Uluchshenie jekspluatsionnyh pokazatelej transportnyh dvigatelej putem sovershenstvovaniya svojstv ohlazhdajushih zhidkostej*: Abstract of PhD diss. (Tech.). SPb.: SPbGPU, 2005.
14. Ivanov, I. E., M. G. Shatrov, and T. Ju. Krichevskaja. *Sistemy ohlazhdeniya porshnevnyh DVS: monografija*. M.: MADI, 2015.
15. Bezjukov, O. K., Ju. A. Grivnin, S. P. Zubrilov, and V. A. Larin. "Issledovanie dinamiki i jerozionnogo vozdeystvija kavitacionnyh polostej." *Mezhvuzovskij sbornik "Vzaimodejstvie tel s granicami razdela sploshnoj sredy"*. Cheboksary, 1985: 21–29.
16. Krasnozhon, P. A., and V. A. Yanchelenko. "Influence of Environmentally-sound coolants on Car Engine Reliability." *Dvigatelsestroyeniye* 2 (2014): 35–37.
17. Makaryev, E. V. "Stand for thermal balance testing of ships internal combustion engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 12–19.

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
Макарьев Евгений Васильевич —
кандидат технических наук,
ведущий инженер проектов.
ООО «МТ-Групп»
Makariev-SMF@yandex.ru
Махфуд Мохаммед Маад — аспирант.
Научный руководитель:
Безюков Олег Константинович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
maad_mahfood@yahoo.com

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, kaf_sdvs@gumrf.ru
Makariev Evgeny Vasilievich —
PhD, principal project engineer.
ООО «MT-Grupp»
Makariev-SMF@yandex.ru
Mahfoud Mohammad Maad — postgraduate.
Supervisor:
Bezyukov Oleg Konstantinovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
maad_mahfood@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2016 года

УДК 621.431.36:629.5.03-08

Н. Г. Кириллов

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА
И ПЕРВЫЙ ОПЫТ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО СУДНА
НА СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

Статья посвящена анализу решения проблем при создании первого российского судна, работающего на сжиженном природном газе. Проанализированы современные экологические требования к морским и речным судам. Рассмотрено влияние водного транспорта на экологию крупных портов, в частности, Санкт-Петербурга. Сделан вывод о необходимости применения природного газа в качестве моторного топлива для судовых двигателей. Изложены уникальные отечественные технологии по переводу судовых дизелей на двухтопливный режим и использованию быстростъемных криогенных емкостей СПГ. Приведены результаты ходовых натурных испытаний судна-газохода с использованием сжиженного природного газа в качестве моторного топлива. В ходе испытаний при работе на двухтопливном режиме судовой энергетической установки был достигнут коэффициент замещения дизельного топлива 70 % (30 % — дизельное топливо, 70 % — сжиженный природный газ). Теоретические работы и натурные испытания первого отечественного судна на сжиженном природном газе проводились под научным руководством автора. Полученный опыт может дать уже в ближайшее время мощный толчок отечественным судостроителям к созданию высокоэкономичных и экологических судов речного и смешанного плавания, а России стать одним из мировых лидеров по применению СПГ на водном транспорте.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, компримированный природный газ, судовая энергетическая установка, газодизель, судно-газоход, емкость СПГ.

**Экологические проблемы эксплуатации водного транспорта
в России и Санкт-Петербурге**

Одним из проявлений перехода развитых стран мира на новый технологический уровень является стремительно растущее применение альтернативных видов моторного топлива, среди которых наиболее перспективным является природный газ. Изначально применение природного газа в качестве моторного топлива на транспортных средствах преследовало технико-эконо-

мические цели: экономию средств на приобретение топлива, поскольку цена эквивалентного количества газа значительно ниже, чем дизельного топлива или бензина, и обеспечение устойчивого топливоснабжения в перспективе с учетом динамики изменения добычи нефти и газа. Важным, с точки зрения экономики, является также снижение текущих расходов на эксплуатацию транспортных средств при использовании природного газа за счет повышения ресурса и надежности работы двигателей, уменьшения расхода смазочного масла и понижение требований к его качеству. Снижение износа основных деталей двигателей (цилиндрово-поршневой группы, кривошипно-шатунного механизма и т. д.) объясняется тем, что при работе двигателя на газе отсутствуют неиспарившиеся жидкие фракции, которые, проникая в рабочие цилиндры двигателя на традиционных нефтяных топливах, вызывают смывание смазки и корродирование стенок цилиндра, а, проникая в картер, разжижают масло. При работе двигателя на природном газе в продуктах сгорания топлива отсутствуют частицы твердого углерода, вызывающие износ деталей [1].

Однако в настоящее время все более актуальным аспектом использования природного газа на транспорте является экологический фактор. Широко известно, что транспорт является одним из основных источников вредных выбросов в окружающую среду, на него приходится около 40 % суммарных выбросов загрязняющих веществ и более 10 % выбросов парниковых газов [2]. Например, в Санкт-Петербурге на долю транспортных источников различного назначения приходится около 92 % выбросов загрязняющих веществ. Из официального Доклада Комитета по охране окружающей среды, природопользования и экологической безопасности Санкт-Петербурга следует, что суммарный выброс загрязняющих веществ в нашем городе пока только растет. В частности, увеличение наблюдается по таким показателям, как оксид углерода, летучие органические соединения и др. По диоксиду азота, например, который содержится в выхлопных газах автомобилей, предельно-допустимая концентрация в воздухе превышена в 20 раз. Если в 2011 г. в Петербурге на одного человека приходилось около 60 кг вредных веществ, то к 2017 г., когда автомобильный парк города составит более 2,5 млн автомобилей, эта цифра возрастет до 75 – 80 кг. По статистике уже сегодня 96 % жителей города на Неве живет в условиях высокого и очень высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха, а экологическую ситуацию в Петербурге можно назвать критической.

Известно, что Санкт-Петербург является крупнейшим в России морским и речным портом, поэтому на экологию воздушного пространства города, ввиду большой агрегатной мощности энергетических установок морских и речных судов, существенное влияние оказывает водный транспорт. Так, например, в Санкт-Петербурге основная доля перевозок водным транспортом приходится на речные перевозки по Неве, связывающей город с Ладожским озером и являющейся конечным отрезком Волго-Балтийского водного пути. Обычно навигация на Неве открывается в середине апреля и закрывается в октябре-ноябре; в год через Санкт-Петербург по реке в среднем проходит более 7 тыс. судов смешанного и внутреннего плавания. Кроме этого, в навигацию 2015 г. в Санкт-Петербурге функционировали многочисленные внутренние маршруты речного водного транспорта: шесть внутренних регулярных субсидируемых маршрутов; транспортные маршруты «Санкт-Петербург – Петергоф» и «Санкт-Петербург – Кронштадт», обслуживаемые скоростными судами типа «Метеор»; а также более 100 экскурсионно-прогулочных маршрутов водного транспорта. С учетом огромного количества речных судов, эксплуатируемых в городской черте Санкт-Петербурга, и морских судов, заходящих в акваторию Финского залива, доля водного транспорта в загрязнении городской воздушной среды в летние месяцы доходит до 10 % от общего количества загрязнений, выбрасываемыми различными видами транспорта [3].

Практический опыт использования альтернативных видов моторного топлива показывает, что применение природного газа в качестве моторного топлива позволяет снизить выбросы токсичных веществ в окружающую среду: оксида углерода — в 2,5 раза, оксида азота — в 2 раза, углеводородов — в 3 раза, задымленности — в 9 раз [4]. Поэтому задача перехода различных видов техники на природный газ, относится к числу приоритетных для транспортного комплекса

Российской Федерации. Основные задачи и обязанности государственных органов по применению природного газа в качестве моторного топлива определены поручениями Президента Российской Федерации от 11 июня 2013 г. № Пр-1298, Правительства Российской Федерации от 24 июня 2013 г. № АД-П9-4314, Комплексным планом мероприятий по расширению использования природного газа в качестве моторного топлива, утвержденным Правительством Российской Федерации 14 ноября 2013 г. № 6819п-П9, Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 г., Энергетической стратегией России на период до 2030 г., Стратегией инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 г. и другими документами.

Необходимо отметить, что кроме загрязнения воздушной среды, другим источником экологической опасности при эксплуатации водного транспорта на традиционных нефтяных видах топлива является загрязнение акваторий портов, рек и водоёмов за счет так называемых «подсланевых вод», которые образуются в машинных отделениях судов и отличаются высоким содержанием нефтепродуктов. Источниками загрязнения могут являться также нефть и нефтепродукты, попадающие в водные ресурсы вследствие недостаточной герметичности корпусов нефтеналивных судов и бункеровочных станций, утечки нефтепродуктов в процессе перегрузки и др. Загрязнение акваторий портов, рек и водоёмов нефтью и нефтепродуктами затрудняет все виды водопользования. Влияние нефти, керосина, бензина, мазута, смазочных масел на водоём проявляется в ухудшении физических свойств воды (замутнение, изменение цвета, вкуса, запаха), растворении в воде токсических веществ, образовании поверхностной плёнки, понижающей содержание в воде кислорода, а также осадка нефти на дне водоёма. Характерный запах, и привкус обнаруживаются уже при концентрации нефти и нефтепродуктов в воде 0,5 мг/л.

Загрязнение нефтью и нефтепродуктами акваторий портов, рек и водоемов приводит к ухудшению качества рыбы (появление окраски, пятен, запаха, привкуса), гибели, отклонениям от нормального развития, нарушению миграции рыб, молоди, личинок и икры, сокращению кормовых запасов (бентоса, планктона), мест обитания, нереста и нагула рыб. Биомасса бентоса и планктона на загрязнённых участках реки резко уменьшается. Токсическое воздействие нефти и нефтепродуктов на рыб обуславливается выделяющимися при разрушении нефти токсическими веществами. Особую опасность представляют нафтенновые кислоты, содержащиеся в нефти и нефтепродуктах. Концентрация нефти в воде 20 – 30 мг/л вызывает нарушение условно-рефлекторной деятельности рыб, их гибель. Донные нефтяные отложения в анаэробных условиях (при дефиците кислорода) сохраняются длительное время и являются источником вторичного загрязнения водоёмов [5].

Только массовый перевод судов смешанного и внутреннего плавания на использование природного газа в качестве моторного топлива позволит решить проблему загрязнения российских акваторий портов, рек и водоёмов нефтепродуктов при эксплуатации водного транспорта.

Обобщая приведенные факты, можно сделать вывод, что в Российской Федерации одним из наиболее перспективных направлений использования природного газа в судах внутреннего и смешанного плавания является перевод на газомоторное топливо судов, работающих в черте крупных городов: прогулочных и экскурсионных судов, буксиров, теплоходов портового флота и лоцманских катеров. С одной стороны, именно для этих судов проблема экологической безопасности стоит особенно остро, а с другой — сохранения водных биоресурсов и чистой воды для водоснабжения крупных населенных пунктов. С учетом данных факторов, использование природного газа в качестве моторного топлива целесообразно, в первую очередь, для судов Волжского, Московского, Камского, Волго-Донского, Северо-Западного, Кубанского и Западно-Сибирского пароходств. Перспективным является также использование судов-газоходов смешанного и внутреннего плавания в районах Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера, где находятся предприятия по добыче природного газа и отсутствуют нефтеперерабатывающие предприятия, что вызывает трудность в обеспечении флота топливом нефтяного происхождения.

Природный газ как моторное топливо на транспортном средстве может находиться в двух состояниях: сжиженном — СПГ и сжатом, т. е. компримированном — КПП. В цилиндры дви-

гателя он подается в газообразном виде, поэтому выбору подлежит состояние, в котором запас газа перевозится на транспортном средстве. В сжиженном состоянии природный газ находится при температуре минус 160 °С, а для его для сохранения в этом состоянии используются криогенные емкости. Однако для таких видов транспорта, как авиационный, железнодорожный и водный, использование компримированного газа весьма проблематично, и перевод этих видов транспорта на газовое топливо возможен только на основе СПГ. Это связано с тем, что применение СПГ позволяет существенно улучшить технические показатели транспортных средств по сравнению с использованием КПГ: уменьшить габариты и массу системы хранения бортового топлива; увеличить полезную грузоподъемность и запас хода от одной заправки; сократить за счет более редких заправок непроизводительные затраты, связанные с холостыми пробегами. Преимущества сжиженного природного газа при использовании в качестве моторного топлива объясняются более высокой его плотностью (в 3 раза) по отношению к компримированному природному газу. Сжижение позволяет уменьшить объем газа, занимаемый в обычных условиях, почти в 600 раз, что приводит, по сравнению со сжатием газа, к уменьшению массы системы хранения природного газа на транспортном средстве в 3 – 4 раза, а объема в 1,5 – 3 раза [6].

Мировые тенденции по использованию сжиженного природного газа на водном транспорте

В настоящее время среди всех видов транспорта наиболее критичная и наиболее обсуждаемая ситуация в вопросе использования сжиженного природного газа складывается, прежде всего, для морского водного транспорта [7].

Необходимость применения природного газа на морских судах определяется существующими и планируемыми к введению нормами по контролю за выбросами оксидов серы и азота и созданием особых районов морских акваторий, где эти выбросы будут контролироваться. В соответствии с Требованиями Приложения VI МК МАРПОЛ, наиболее жесткие требования устанавливаются для районов контроля выбросов (Emission Control Areas — ECA), к числу которых относятся Балтийское и Северное моря, прибрежные воды США и Канады, Карибское море, Средиземное море, побережье Японии, Малаккский пролив (рис. 1).

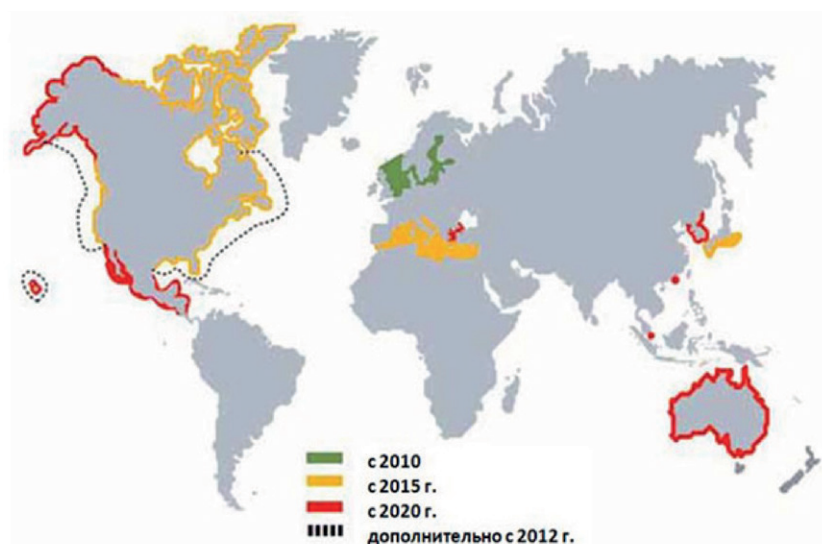


Рис. 1. Районы контроля выбросов (ECA)

Так, уже с 1 января 2015 г. в зонах особого контроля над выбросами серы (Sulphur Emission Control Areas — SECA), в число которых входят Балтийское и Северное моря, содержание серы в судовом топливе не должно превышать 0,1 % (это в 10 раз меньше, чем было разрешено до 2015 г.). Особые требования для дизельных двигателей разработаны Европейским Союзом. В частности,

выброс серы при нахождении в портах Евросоюза не должен превышать 0,1 – 0,2 %. При невыполнении этого требования судно должно получать более дорогую береговую электроэнергию, а с 2016 г. в ЕС использование высокосернистого мазута будет караться конфискацией судна.

С 2020 г. будет введено ограничение на содержание серы в судовом топливе на уровне не более 0,5 % по всему миру. В 2022 г. начнет действовать международное соглашение о придании Балтийскому морю статуса NECA (Nitrogen Emission Control Area) — зоны особого контроля над выбросами окислов азота. В соответствии с положениями Конвенции МАРПОЛ, статус района NECA предполагает, что все суда, построенные после 1 января 2022 г. и эксплуатируемые в таком районе, должны иметь дизельные установки, отвечающие стандартам Уровня III.

Мазут, как традиционное судовое топливо, не сможет удовлетворять новым требованиям. Это означает, что судовладельцам и операторам судов придется либо устанавливать дорогостоящее оборудование (скрубберы) по очистке судовых отработанных газов, либо переходить на использование сжиженного природного газа. В настоящее время практически все судовладельцы, готовясь к вводимым ограничениям, в качестве наиболее эффективного варианта рассматривают переход на использование СПГ для судовых энергетических установок. Природный газ позволяет полностью исключить выброс окислов серы и твердых частиц, снизить на 90 % выбросы окислов азота и уменьшить выбросы CO₂ на 30 %.

Мировой опыт показывает, что в судовой энергетике природный газ может использоваться только в виде сжиженного природного газа ввиду наиболее приемлемых массогабаритных характеристик топливной системы. Если сегодня в мире насчитывается около 100 морских и речных судов на СПГ, то к 2030 г., по прогнозам, их будет в 370 раз больше, т. е. 3700. В соответствии со стратегией, подготовленной Европейской комиссией, к 2020 г. все морские порты ЕС, а к 2025 г. — также все крупные речные порты должны быть оборудованы пунктами бункеровки сжиженным природным газом. При этом портовые власти будут вольны определять конкретные способы бункеровки и логистики СПГ. Пункты бункеровки предполагается оборудовать не только в портах Северного и Балтийского морей (зона особого контроля над выбросами серы, ЕСА), но и во всех других портах, включая средиземноморские. Спрос на судовое газомоторное топливо возрастет с 0,6 млн т/г., до около 16 млн т/г. к 2030 г. Это не только колоссальный рынок СПГ-бункеровки, но и значительные затраты для судовладельцев. Поэтому власти ЕС уже сейчас озабочены переводом судов на СПГ и выделяют на это финансирование и гранты.

Маршруты основной части морских грузоперевозок России проходят через районы контроля выбросов, в частности через Балтийское и Северное моря, соответственно для нашей страны переход на новые экологические стандарты имеет особую актуальность. Принятие указанных ограничений неминуемо повлечет за собой существенное уменьшение грузооборота морским транспортом со странами ЕС и Англии, и, как следствие — существенное уменьшение торгового оборота в случае, если заранее не побеспокоиться о необходимых технических мероприятиях по соответствию новым экологическим требованиям [8].

Тема использования природного газа актуальна и для речных судов. С одной стороны, из-за большой агрегатной мощности энергетических установок речные суда являются основным источником загрязнения атмосферы в таких локальных зонах, как порты в черте городов, гидротехнические сооружения и акватории рек. С другой стороны, переход на природный газ позволит снизить себестоимость перевозок речным транспортом и переключить часть грузов с автомобильного и железнодорожного видов транспорта на речной транспорт.

Перевод речных судов на применение СПГ — общемировой тренд в развитии судовой энергетики. Так, в ноябре 2015 г. исследовательская компания *DNV GL Netherlands* завершила работы по оценке создания Трансевропейской транспортной сети на основе СПГ-коридора на маршруте рек Рейн – Майн и Дунай. Исследование финансировал консорциум, состоящий из 50 европейских компаний, в том числе Группы портов Рейна, включающей в себя порты Роттердама, Антверпена, Страсбурга и Мангейме (рис. 2). Эти порты играют ведущую роль в Европе по развитию использования СПГ в качестве топлива для внутренних водных путей.

Представители *DNV GL* отмечают, что исследование помогло завершить дискуссии вокруг вопроса использования СПГ в качестве судового топлива для речного транспорта и начать развитие данного инновационного направления.



Рис. 2. Заправка судна смешанного плавания сжиженным природным газом в порту Роттердама

Первый российский опыт создания отечественного судна-газохода на сжиженном природном газе

Ранее сжиженный природный газ на отечественном речном транспорте не использовался. Основной причиной являлось отсутствие отечественного опыта в создании судовых энергетических установок, использующих СПГ в качестве моторного топлива. Однако в настоящее время ситуация кардинально изменилась — создано первое отечественное судно-газоход на СПГ, что явилось технологическим прорывом использования сжиженного природного газа в судовой энергетике.

В настоящее время под руководством автора специалистами компании ООО «НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания»» (ООО «НПО «СПБЭК»») завершена опытно-конструкторская работа (ОКР) по созданию первого российского судна-газохода на сжиженном природном газе. В рамках данной работы на использование сжиженного природного газа был переведен специально приобретенный теплоход «Нева-6» валовой вместимостью около 210 рег. т, ранее работавший только на дизельном топливе (рис. 3).

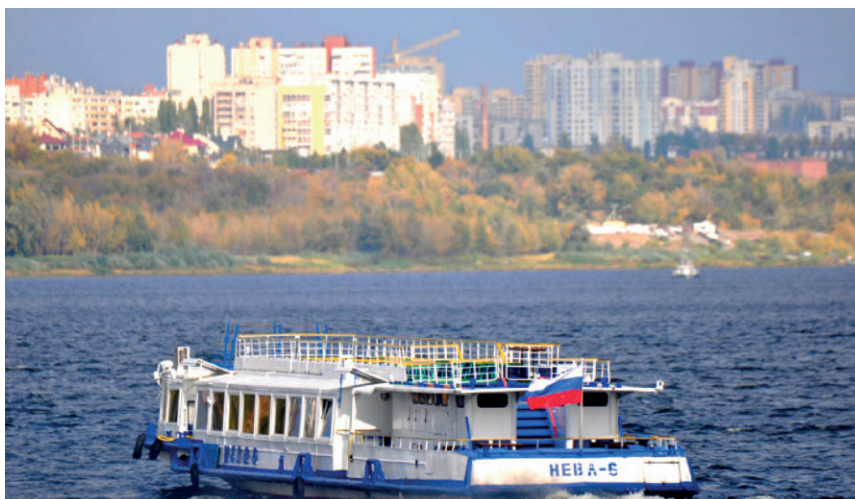


Рис. 3. Внешний вид приобретенного теплохода «Нева-6» перед модернизацией для работы на сжиженном природном газе

В ходе выполнения ОКР специалистами ООО «НПО «СПБЭЖ»» были разработаны новые отечественные технологии:

- по переводу судовых дизелей на двухтопливный газодизельный режим работы с использованием СПГ в качестве основного моторного топлива (коэффициент замещения 70 %);
- по конструктивному исполнению и размещению изотермических емкостей с криогенным топливом;
- по конструктивному исполнению промежуточного контура с теплоносителем для испарения сжиженного природного газа;
- по системам автоматизированного управления двухтопливным режимом работы судовой энергетической установки на основе двух газодизелей;
- по системам пожаротушения и ликвидации аварийных ситуаций при эксплуатации судовогазоводов на СПГ.

При переводе судовых дизелей ЗДб модернизируемого судна «Нева-6» на двухтопливный режим был выбран вариант внешнего смесеобразования. При таком смесеобразовании природный газ подается во впускной воздушный коллектор, из которого газозвдушная смесь поступает в цилиндры дизельного двигателя. В конце такта сжатия в цилиндр впрыскивается запальная доза дизельного топлива (порядка 30 % от номинальной цикловой подачи), которое необходимо вследствие того, что давление в конце сжатия не обеспечивает достижения температуры самовоспламенения метана, составляющей 650 – 720 °С и значительно превышающей температуру самовоспламенения дизельного топлива (350 – 400 °С). Такой способ воспламенения, обеспечивает возможность быстрого перехода с газового топлива на дизельное и обратно [9].

Уникальность указанного ОКР заключается в том, что перевод судовой энергетической установки пассажирского судна типа «Нева» на двухтопливный газодизельный режим работы производится без демонтажа штатных судовых дизелей. Судно дополнительно оснащается комплектом навесного газового оборудования с системой автоматического управления двухтопливным режимом (рис. 4), оптимизированной на береговом испытательном стенде для замещения 70 % дизельного топлива при работе на номинальной мощности. Такой подход в значительной степени позволяет снизить затраты на перевод судна или другого транспортного средства на газодизельный цикл работы.

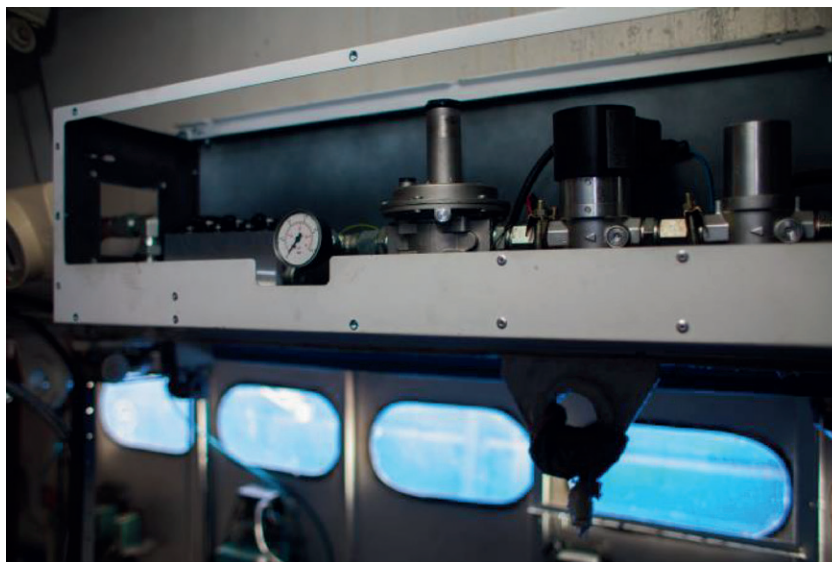


Рис. 4. Комплект навесного газового оборудования для подачи природного газа, размещенного на боковой стенке машинного отделения судна-газовода «Нева-6»

Основные рабочие параметры газодизеля, такие как температура выхлопных газов, температура масла и охлаждающей жидкости, остаются в пределах допусков, установленных заводом-

изготовителем. Как только в двигатель поступает газ, регулятор уменьшает подачу дизельного топлива, сохраняя номинальные обороты и обеспечивая необходимую выходную мощность. Система автоматизированного управления двухтопливным режимом позволяет обеспечивать автоматический перевод работы судовых двигателей с газового топлива на дизельное и ручной перевод работы судовых двигателей с дизельного топлива на газовое. Контролируемые параметры газодизеля: температура выхлопных газов, давление и температура воздуха во впускном коллекторе, разрежение на впуске и вибрация двигателя, давление природного газа на входе и на выходе из регулятора и др.

Система автоматического управления двухтопливным режимом переводит работу двигателя на использование только дизельного топлива, при сохранении необходимого уровня выходной мощности, при возникновении одной из следующих ситуаций: отсутствие природного газа; предельно низкое или высокое давление природного газа после испарителя; высокая температура выхлопных газов; низкая нагрузка по сравнению с номинальной мощностью (менее 15 %); нагрузка более 100 % от номинальной мощности. Пуск и остановка газодизеля на основе модернизированного двигателя ЗДб происходит только на дизельном топливе.

Решения по обеспечению безопасности опытной эксплуатации судна, переоборудованного для работы СПГ, основывалось на положениях, предусмотренных Дополнением № 2 «Временные технические требования к судам-газоходам, использующим компримированный природный газ» к Правилам классификации и постройки судов внутреннего плавания Российского Речного Регистра, которые были утверждены распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации № НС-17-р от 30.01.2004 г.

При создании судна-газохода на СПГ специалистами ООО «НПО «СПБЭК» впервые в мире и России была разработана и применена технология применения быстросъемных криогенных модулей для хранения сжиженного природного газа на борту судна. Разработанная технология предусматривает погрузку уже заправленных сжиженным природным газом быстросъемных криогенных модулей (рис. 5), что снижает затраты потенциальных судовладельцев и исключает все проблемы, связанные с вопросами технологического обслуживания модулей (заправки, расхолаживания, захолаживания, дегазации, слива, хранения СПГ и т. д.), которое осуществляется непосредственно на месте заправки модулей сжиженным природным газом квалифицированными специалистами по криогенной технике [10].



Рис. 5. Погрузка быстросъемных криогенных модулей со сжиженным природным газом СПГ на теплоход «Нева-6»

Доставка быстросъемных криогенных модулей может быть осуществлена от места производства (места заправки) СПГ до места бункеровки (например, речного порта) специализирован-

ными грузовыми автомобилями. Замена криогенных модулей с СПГ может быть осуществлена в любом месте, где возможна швартовка судна и есть место для установки погрузчика (например, автомобильного крана). Замена криогенных модулей будет занимать не более 3 ч.



Рис. 6. Быстросъемные криогенные модули СПГ, установленные на фундаменте из металлических двутавровых балок (верхняя палуба теплохода «Нева-6»)

В соответствии с разработанной технологией, на открытой верхней палубе судна был заблаговременно подготовлен фундамент для быстросъемных криогенных модулей, который представляет собой каркас из соединенных металлических двутавровых балок, приваренных к бортам судна (рис. 6). В настоящее время, с учетом накопленного опыта, специалисты ООО «НПО «СПБЭК»» готовы разработать техническую документацию по дооборудованию отечественных судов смешанного и внутреннего плавания для работы на СПГ.

Экспериментальные швартовые и ходовые испытания судна-газохода проходили в акватории г. Волгограда (рис. 7) и показали, что использование сжиженного природного газа в качестве моторного топлива на судах внутреннего плавания не только технически возможно, но и экономически целесообразно.



Рис. 7. Судно-газоход «Нева-6» на ходовых испытаниях в районе речного порта г. Волгоград

Так, результаты швартовых испытаний судна-газохода «Нева-6» позволяют сделать несколько важных выводов:

– не нужно вносить значительных изменений в существующие судовые двигатели и топливную аппаратуру;

- газосмесительное оборудование конструктивно просто, не содержит сложных и прецизионных деталей и узлов и при серийном выпуске сравнительно недорого;
- при эксплуатации снижение финансовых расходов на топливо практически пропорционально соотношению цен «дизельное топливо – сжиженный природный газ»;
- при отсутствии сжиженного природного газа всегда можно вернуться к 100 %-му использованию только дизельного топлива;
- существенную статью расхода составляет оборудование для хранения запаса СПГ. Его стоимость зависит от вида емкостей для хранения и способа их размещения на судне;
- при использовании двухтопливного режима было достигнуто значительное снижение концентрации вредных веществ в отработанных газах от 20 до 40 %; значительное снижение шумности и увеличение ресурса судовой двигательной установки и др.

Заключение

Анализ использования различных видов моторных топлив по критерию «экологичности», показывает, что наиболее чистым топливом является природный газ. Проблемы экологической безопасности водного транспорта являются составной частью экологической безопасности страны. В настоящее время очевидно, что, если Россия хочет решить проблемы экологии водного транспорта и не отстать от мировых тенденций развития современного морского и речного судостроения, необходимо срочно начать инвестировать средства в организацию газификации судовой энергетики на основе использования сжиженного природного газа как наиболее дешевого и экологически чистого вида моторного топлива.

Использование СПГ как универсального моторного топлива XXI в. — интенсивно развивающееся направление, которое уже в ближайшее время может превратиться в самостоятельную высокорентабельную отрасль отечественной экономики. В рамках этого направления, полученный специалистами ООО «НПО «СПбЭК»» уникальный опыт по созданию первого в России судна-газохода на СПГ с судовой энергетической установкой, работающей в двухтопливном режиме, даст уже в ближайшее время мощный толчок российским судостроителям к созданию высокоэкономичных и экологических судов речного и смешанного плавания. Трудность решения указанных задач определялась полным отсутствием отечественного практического опыта по использованию сжиженного природного газа в судовой энергетике.

Переход на сжиженный природный газ позволит снизить себестоимость перевозок водным транспортом и переключить часть грузов с авиационного, автомобильного и железнодорожного видов транспорта на морской и речной транспорт.

Однако для масштабного перехода водного транспорта на использование сжиженного природного газа предусматривается:

- стимулирование разработки и производства судов внутреннего и смешанного плавания, работающих на СПГ, повышение их надежности, безопасности и энергоэффективности, развитие сопутствующей сервисной инфраструктуры;
- развитие заправочной инфраструктуры СПГ на внутренних водных путях Российской Федерации;
- разработка механизмов стимулирования использования природного газа в качестве газомоторного топлива и совершенствование нормативно-правового обеспечения в сфере использования СПГ и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов Н. Г. Экология и автотранспорт: о необходимости перехода на природный газ как перспективное моторное топливо / Н. Г. Кириллов, А. Н. Лазарев // Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2010. — № 4 (52). — С. 4–10.

2. Кириллов Н. Г. Анализ перспективности различных видов альтернативных моторных топлив: сжиженный природный газ — моторное топливо XXI века / Н. Г. Кириллов, А. Н. Лазарев // Двигателестроение. — 2010. — № 1. — С. 26–33.
3. Епифанов В. С. Применение природного газа в судовых энергетических установках / В. С. Епифанов // Речной транспорт (XXI век). — 2008. — № 4. — С. 77–84.
4. Кириллов Н. Г. Новые технологии в применении сжиженного природного газа как моторного топлива и хладагента для авторефрижераторной техники и автотранспортных средств / Н. Г. Кириллов. — М.: ИРЦ «Газпром», 2003. — 30 с.
5. Голубев Г. Н. Геоэкология / Г. Н. Голубев. — М.: ГЕОС, 1999. — 338 с.
6. Кириллов Н. Г. Сжиженный природный газ: анализ мирового рынка и перспективы отечественного производства / Н. Г. Кириллов // Газохимия. — 2011. — № 6. — С. 23–29.
7. Безюков О. К. Газомоторное топливо на водном транспорте / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. И. Ященко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 31–39.
8. Кириллов Н. Г. Сжиженный природный газ как универсальное моторное топливо XXI века: технологии производства и системы долгосрочного хранения / Н. Г. Кириллов. — М.: ИРЦ «Газпром», 2002. — 64 с.
9. Анкаров И. А. Внешние показатели различных способов смесеобразования в малоразмерных судовых дизелях / И. А. Анкаров, К. К. Колосов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 2. — С. 55–58.
10. Кириллов Н. Г. Проблемы создания хранилищ СПГ в России / Н. Г. Кириллов // Gasworld Россия и СНГ. — 2013. — № 32. — С. 32–33.

THE FIRST EXPERIENCE OF THE RUSSIAN SHIP-USING LIQUEFIED NATURAL GAS AS MOTOR FUEL

The article is devoted to the analysis of solutions when creating the first Russian ship on liquefied natural gas. There were analyzed the current environmental requirements for the maritime and river vessels. The influence of water transport on the ecology of large ports, in particular, the city of St. Petersburg was analyzed. The conclusion about the necessity of using natural gas as a motor fuel for engines was made. There are set out the unique domestic technologies of transfer of marine diesel engines to dual fuel mode and the use of mobil-cryogenic LNG tanks. The results of running full-scale tests of the ship using liquefied natural gas as a motor fuel. During testing, there has been made the replacement rate of diesel fuel 70% (30% – diesel fuel, 70% – liquefied natural gas) when the marine power installation was working on dual mode. Theoretical work and field testing of the first domestic ship on natural liquefied gas were carried out under the supervision of the author. The experience can give a strong impetus to domestic shipbuilders to create a highly economical and ecological river and mixed ships, and Russia will become one of the world leaders in the use of LNG in water transportation in the near future.

Keywords: liquefied natural gas, compressed natural gas, marine power plant, gas diesel, ship gas flue, tank LNG.

REFERENCES

1. Kirillov, N. G., and A. N. Lazarev. “Ecology and motor transport: about necessity of transition to natural gas as perspective motor fuel.” *Avtogazozapravochnyj kompleks + Alternativnoe toplivo* 4(52) (2010): 4–10.
2. Kirillov, N. G., and A. N. Lazarev. “Alternative Fuels: Liquefied Natural Gas – Motor Fuel of XXI Century.” *Dvigatelistroyeniye* 1 (2010): 26–33.
3. Epifanov, V. S. “Primenenie prirodnogo gaza v sudovyh jenergeticheskikh ustanovkakh.” *River transport (XXIst century)* 4 (2008): 77–84.
4. Kirillov, N. G. *Novye tehnologii v primenenii szhizhennogo prirodnogo gaza kak motornogo topliva i hladagenta dlja avtorefrizheratornoj tehniki i avtotransportnyh sredstv*. M.: IRC «Газпром», 2003.
5. Golubev, G. N. *Geojekologija*. M.: GEOS, 1999.
6. Kirillov, N. G. “Szhizhennyj prirodnyj gaz: analiz mirovogo rynka i perspektivy otechestvennogo proizvodstva.” *Gazohimija* 6 (2011): 23–29.

7. Bezjukov, O. K., V. A. Zhukov, and O. I. Jashhenko. "Dual-fuel engines on water transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarova* 6(28) (2014): 31–39.
8. Kirillov, N. G. *Szhizhennyj prirodnyj gaz kak universalnoe motornoe toplivo XXI veka: tehnologii proizvodstva i sistemy dolgosrochnogo hranenija*. M.: IRC «Gazprom», 2002.
9. Apkarov, Idris Adamovich, and Konstantin Konstantinovich Kolosov. "External indicators of various methods of mixture formation in small marine diesel engines." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2011): 55–58
10. Kirillov, N. G. "Problemy sozdaniya hranilishh SPG v Rossii." *Gasworld Rossija i SNG* 32 (2013): 32–33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кириллов Николай Геннадьевич —
доктор технических наук,
Заслуженный изобретатель РФ,
заместитель генерального директора
по перспективным разработкам
и защите интеллектуальной собственности.
ООО «НПО «Санкт-Петербургская
электротехническая компания»»
kirillov_ng@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirillov Nikolay Gennadievich —
Dr. of Technical Sciences,
Honored Inventor of the Russian Federation,
Deputy General Director
of Advanced Engineering and Protection
of Intellectual Property
«NPO «Saint-Petersburg Electrotechnical
Company»»
kirillov_ng@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.

УДК 621.432

**В. А. Жуков,
А. И. Яманин**

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА КИНЕМАТИКИ КРИВОШИПНО-ШАТУННЫХ МЕХАНИЗМОВ С ПРИЦЕПНЫМИ ШАТУНАМИ

Статья посвящена сравнительной оценке различных расчетных методик, применяемых для кинематического анализа кривошипно-шатунного механизма. Расчет кинематических параметров прицепных поршней кривошипно-шатунных механизмов V-образных двигателей по различным аналитическим алгоритмам способен приводить к существенным различиям результатов, что ведет к снижению точности динамического анализа механизма и прочностных расчетов деталей. С использованием различных аналитических методик и методов численного моделирования определены перемещение, ускорение поршня и гармонические составляющие ускорения для кривошипно-шатунного механизма судового дизеля М400, выполнено сравнение точности полученных результатов. На основании сравнения погрешностей результатов показана эффективность численного моделирования и анализа таких механизмов методами и средствами современной САД/САЕ-технологии. Использование методов и средств САД/САЕ-технологии позволяет повысить точность кинематических, динамических, прочностных расчетов и качество проектирования двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: кривошипно-шатунный механизм, прицепной шатун, поршень, аналитический алгоритм, численное моделирование и анализ, перемещение, ускорение поршня, судового дизель, САД/САЕ-технологии.

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ анализ кривошипно-шатунных механизмов (КШМ) двигателей внутреннего сгорания предшествует динамическому анализу КШМ и прочностным расчетам деталей КШМ. Точность результатов, полученных при кинематическом анализе, существенным образом влияет на достоверность определения сил, действующих в КШМ и корректность последующих прочностных расчетов деталей. В связи с этим актуальной является задача оценки точности различных расчетных методик, применяемых для кинематического анализа.

Одним из распространенных типов КШМ, применяемым в транспортных двигателях практически всех назначений, является механизм с прицепным шатуном. Такой механизм обладает рядом преимуществ по сравнению с прочими типами КШМ (уменьшение длины коленчатого вала и всего двигателя, некоторое увеличение рабочего объема бокового цилиндра и, следовательно, мощности, возможность создания звездообразных компоновочных схем и т. д.). Вместе с тем, известно, что законы движения поршня и шатуна бокового цилиндра отличаются от таковых для поршня и шатуна главного цилиндра. Это обстоятельство ранее осложняло динамический расчет двигателей с КШМ с прицепным шатуном.

Расчет кинематики таких двигателей рассмотрен в ряде работ прошлых лет [1] – [5]. Полученные авторами аналитические формулы используются при практических вычислениях до сих пор. Следует заметить, что при сходных допущениях (в частности, об описании кинематических параметров прицепного поршня двумя основными гармоническими составляющими) авторами этих работ приведены отличающиеся друг от друга формулы; различаются также входящие в эти формулы условные обозначения и т. п. В связи с этим предпринимается попытка сопоставления результатов расчета по различным алгоритмам.

В настоящее время кинематический расчет сложных механизмов может эффективно выполняться средствами САД/САЕ-технологий при помощи специализированных программных продуктов для исследования динамики механических систем [6], [7]. Целью проведенных исследований было сравнение точности результатов аналитического расчета с результатами, полученными численными методами.

На рис. 1 приведена схема КШМ с прицепным шатуном, используемая во всех упомянутых расчетных алгоритмах.

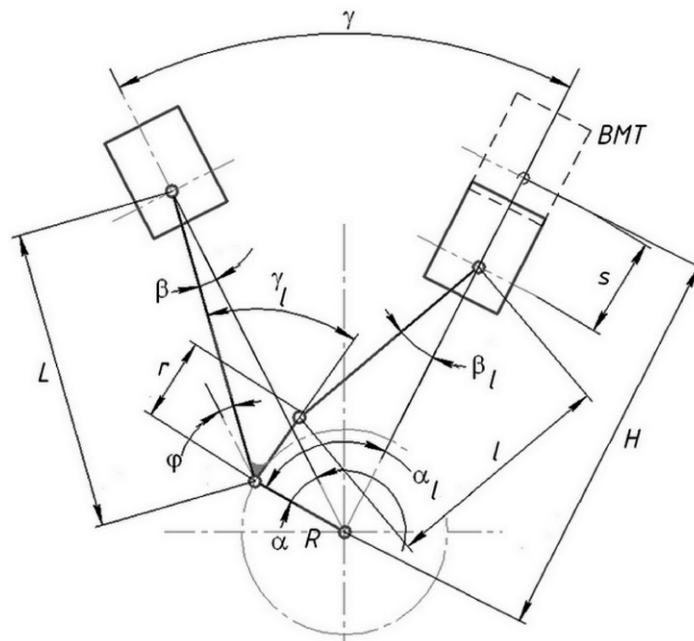


Рис. 1. Кинематическая схема КШМ с прицепным шатуном

Исходными данными к расчету служат значения радиуса кривошипа R , длины шатуна L , угла развала цилиндров γ , радиуса прицепа r , длины прицепного шатуна l и угла прицепа γ_l . Как правило, в V-образных двигателях $\gamma < \gamma_l$. Однако Е. Д. Львовым неравенство этих углов вообще предлагается не учитывать [8], что может приводить к значительным погрешностям.

В общем случае двигатель может быть выполнен с дезаксиалами главного и бокового цилиндров, которые в большинстве расчетных формул не учитывают; в нашем случае они тоже не будут учитываться. В ряде алгоритмов используется также размер L между центрами поршневой головки главного шатуна и прицепного соединения (рис. 2).

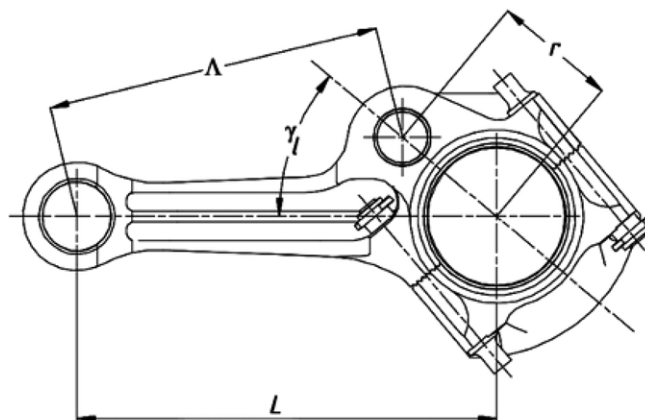


Рис. 2. Конструктивные размеры КШМ с прицепным шатуном

Угол поворота вала α отсчитывается от оси главного цилиндра до кривошипа (принимается, что вал вращается против часовой стрелки). В расчеты вводится также угол α_1 , отсчитываемый от оси бокового цилиндра до кривошипа. Между углами α и α_1 существует взаимосвязь $\alpha_1 = \alpha + \gamma$. Кроме этого на рис. 1 указаны углы β и β_1 отклонения главного и прицепного шатунов от осей соответствующих цилиндров. В начальный момент времени при $\alpha = 0^\circ$ поршень, связанный с главным шатуном, находится в верхней мертвой точке.

Как правило, при кинематическом анализе определяют зависимости от угла поворота кривошипа перемещений, скоростей и ускорений главного и прицепного поршней, угловых перемещений, угловых скоростей и угловых ускорений главного и прицепного шатунов, углы поворота коленчатого вала α_{11} и α_{12} , соответствующие положениям прицепного поршня в верхней и нижней мертвых точках. При анализе размеров механизма большинство алгоритмов предусматривают определение такого положения днища крышки бокового цилиндра, которое обеспечивает равенство значений степени сжатия в обоих цилиндрах.

При расчетах первоначально определяют ряд постоянных безразмерных коэффициентов и вспомогательных величин:

- 1) отношение радиуса кривошипа к длине главного шатуна $\lambda = R/L$;
- 2) отношение радиуса прицепа к длине прицепного шатуна $\lambda_1 = r/l$;
- 3) отношение радиусов кривошипа и прицепа $\rho = R/r$;
- 4) разность углов прицепа и развала цилиндров $\psi = \gamma_1 - \gamma$;
- 5) коэффициент λ_1 .

И. Ш. Нейманом, а также В. Н. Ширяевым было использовано обозначение $\lambda\Lambda/l$. В большинстве других алгоритмов такое обозначение используется для отношения радиуса прицепа к длине прицепного шатуна. В связи с этим для величины $\lambda\Lambda/l$ будем использовать символ λ_1 .

Многие расчетные алгоритмы при определении закона движения прицепного поршня предусматривают определение его расстояния s от верхней мертвой точки до положения в данный момент времени, соответствующий углам α и α_1 . Далее углы поворота главного и прицепного шатунов β и β_1 выражаются иррациональными алгебраическими и тригонометрическими уравнениями, которые представляются в виде тригонометрических и/или степенных рядов. В большинстве случаев ограничиваются двумя низшими гармоническими составляющими последних. Большая часть расчетных алгоритмов опирается на упомянутую работу И. Ш. Неймана, но расчетные формулы в ряде случаев заметно отличаются, что, очевидно, объясняется разными способами выполнения упомянутых алгебраических и тригонометрических преобразований. Это в несколько меньшей степени сказывается на результатах расчета перемещений прицепного поршня, но приводит к достаточно заметным расхождениям при расчетах его ускорений и, следовательно, сил инерции.

Точный расчет перемещения и ускорения прицепного поршня предполагает предварительное определение угла поворота, угловой скорости и углового ускорения прицепного и главного

шатунов. Формулы для таких расчетов менее известны, в связи с чем многие авторы (И. А. Биргер и др.) указывают, что предпочтительнее использование приближенных выражений, а вывод аналитических формул для расчета гармонических составляющих высших порядков даже нецелесообразен. В случае необходимости их использования рекомендуется разложение в гармонический ряд результатов расчета s , w и проч. при помощи каких-либо инструментальных средств, численных методов и т. п. В ряде случаев (А. М. Кац, А. И. Володин) приводятся сходные по структуре окончательные расчетные формулы, однако некоторые из вспомогательных коэффициентов рассчитываются по разным выражениям [9] – [11].

Отличием алгоритма П. А. Истомина является то, что реальный КШМ с прицепным шатуном уподобляется фиктивному центральному механизму с неким приведенным радиусом кривошипа, поворачивающимся на величину приведенного угла поворота. Значения этих (и ряда других) приведенных параметров таковы, что в фиктивном центральном КШМ воспроизводится движение реального механизма с прицепным шатуном. Кроме того, П. А. Истоминым предложена формула для определения величины хода прицепного поршня S_p , тогда как во многих других случаях эта величина определяется при сортировке массива результатов расчета S . Другая формула того же назначения предложена также Н. К. Смольяниновым. От упомянутых алгоритмов несколько отличается алгоритм, описанный И. И. Холмаковым, в котором изначально предусматривается учет гармонических составляющих не только низших, но и высших порядков. Несколько иной способ определения кинематических параметров прицепного поршня предложен Е. А. Григорьевым [12]. В соответствии с упоминаемым алгоритмом вводится специальная система координат, связанная с боковым цилиндром, в которой и выражается перемещение прицепного поршня. Скорость и ускорение последнего определяются численным дифференцированием перемещения (подобный подход использован также М. В. Семеновым [13]).

Современные численные методы моделирования динамических систем решают подобные задачи на основе численного интегрирования дифференциальных уравнений движения их звеньев. При этом сами уравнения движения формируются автоматически на основе уравнений Лагранжа 1-го рода с учетом изменения кинетической энергии механизма, а их численное интегрирование выполняется методом Рунге – Кутты. Такие алгоритмы реализуются в среде многих профессиональных

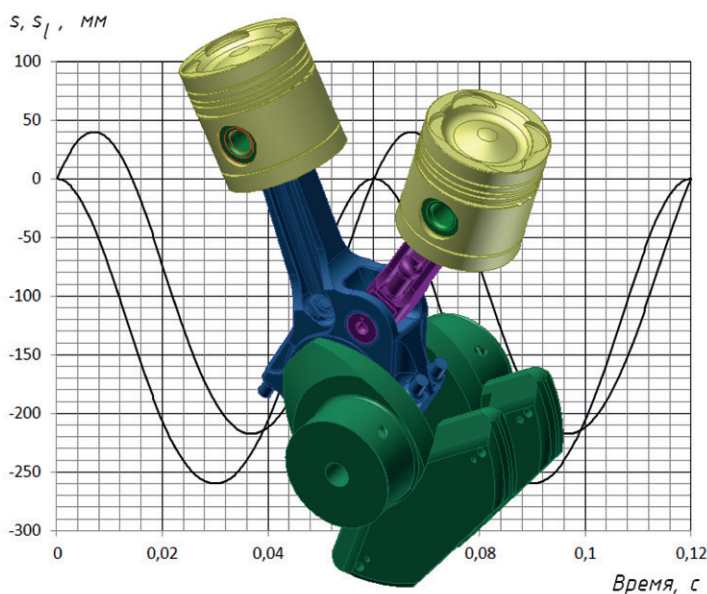


Рис. 3. Твердотельная модель V-образного отсека двигателя в среде динамического моделирования программного продукта Autodesk Inventor

программных продуктов (ADAMS, Cosmos Motion, UM, ФРУНД, модули динамического расчета систем Autodesk Inventor, NX, Creo Mechanical и др.¹). Этот подход рядом авторов признается более перспективным [14], [15].

По приведенным алгоритмам проведены расчеты перемещения и ускорения прицепного поршня судового двигателя типа ЧН18/20 с параметрами $R = 100$ мм, $L = 372$ мм, $r = 90$ мм, $l = 256$ мм, $\gamma = 60^\circ$, $\gamma_l = 66^\circ$, $\Lambda = 165$ мм, $\delta = 13,25^\circ$. Двигатели этой размерности (М400, М401) находят широкое применение на скоростных судах на подводных крыльях. Те же кинематические параметры определены численным методом с использованием твердотельных моделей КШМ (рис. 3).

¹ При моделировании и анализе механизмов в среде большинства упомянутых программных продуктов предусмотрен расчет кинетической энергии.

Результаты расчета перемещения прицепного поршня показаны на рис. 4, 5.

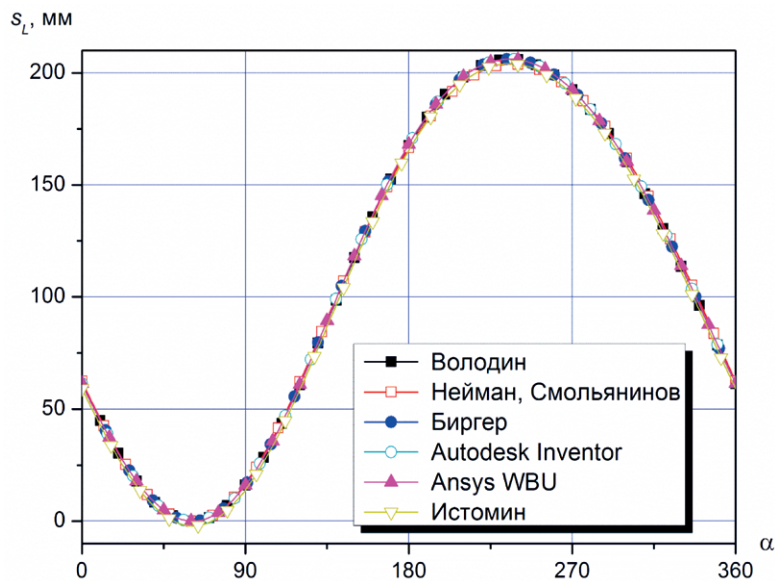


Рис. 4. Результаты аналитического и численного расчета перемещения прицепного поршня двигателя ЧН18/20

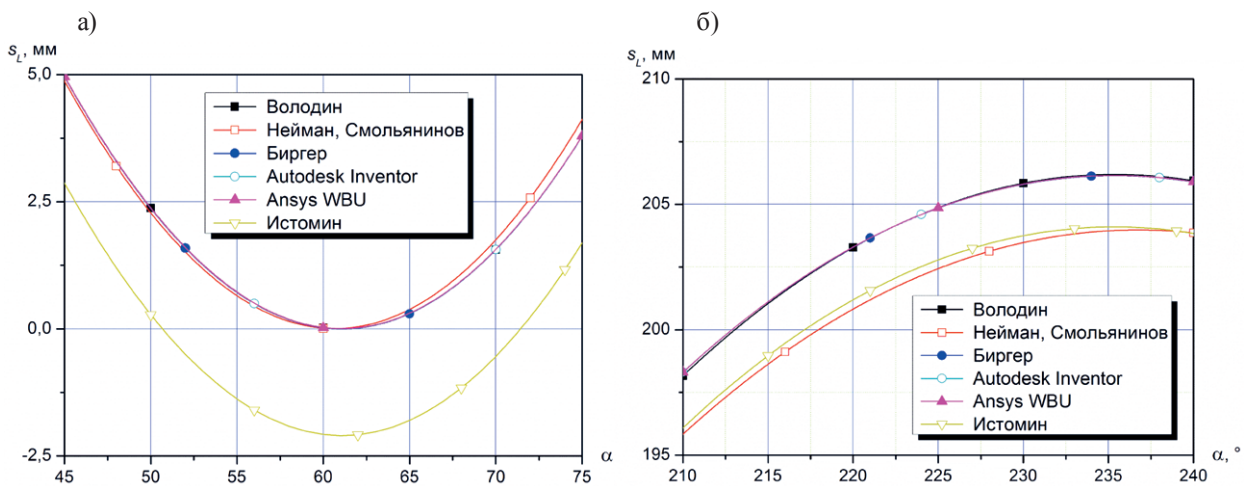


Рис. 5. Результаты аналитического и численного расчета перемещения прицепного поршня двигателя ЧН18/20 в области верхней (а) и нижней (б) мертвых точек

Видно, что при достаточно удовлетворительном совпадении общего характера протекания кривых $s = f(\alpha)$ по большинству аналитических алгоритмов (рис. 4) имеет место заметное различие результатов аналитических расчетов в области мертвых точек (рис. 5). Различаются (до 1,5 мм) как значения координат прицепного поршня, так и угла поворота вала, соответствующего положению поршня в мертвой точке. В связи с этим вопрос выбора расчетного алгоритма становится важным при разработке корректных алгоритмов электронного управления топливоподачей, а также для определения положения крышки цилиндра для обеспечения идентичности значений степени сжатия в главном и боковом цилиндрах. То же наблюдается и для ускорения прицепного поршня (рис. 6, 7, табл. 1).

Таблица 1

Величина хода прицепного поршня двигателя типа ЧН18/20, вычисленная по различным аналитическим алгоритмам и при численном моделировании, мм

Аналитические алгоритмы						Численное моделирование	
Кац	Володин	Нейман, Смольянинов	Биргер	Холмаков	Истомин	Autodesk Inventor	Ansys WBU
206,20	206,20	204,00	206,15	204,08	206,20	206,15	206,15

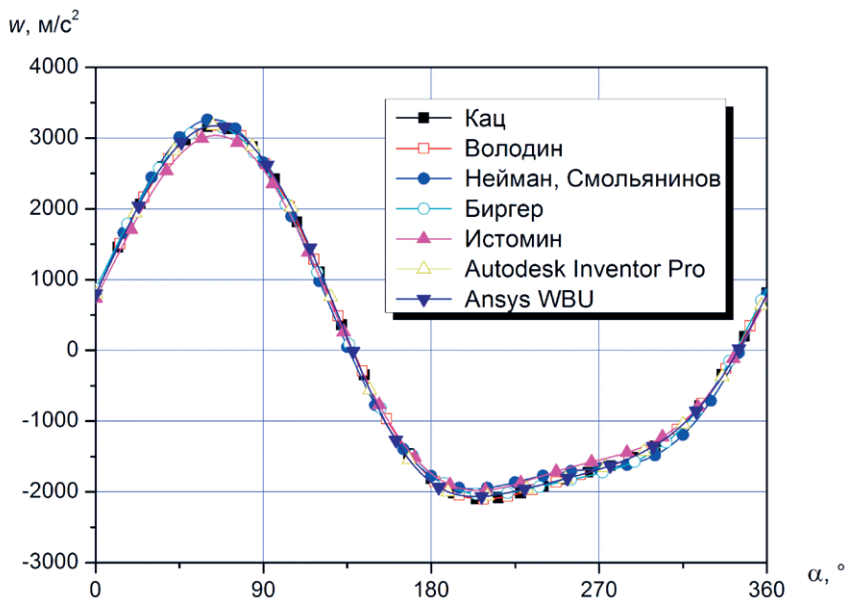


Рис. 6. Результаты аналитического и численного расчета ускорения прицепного поршня двигателя ЧН18/20

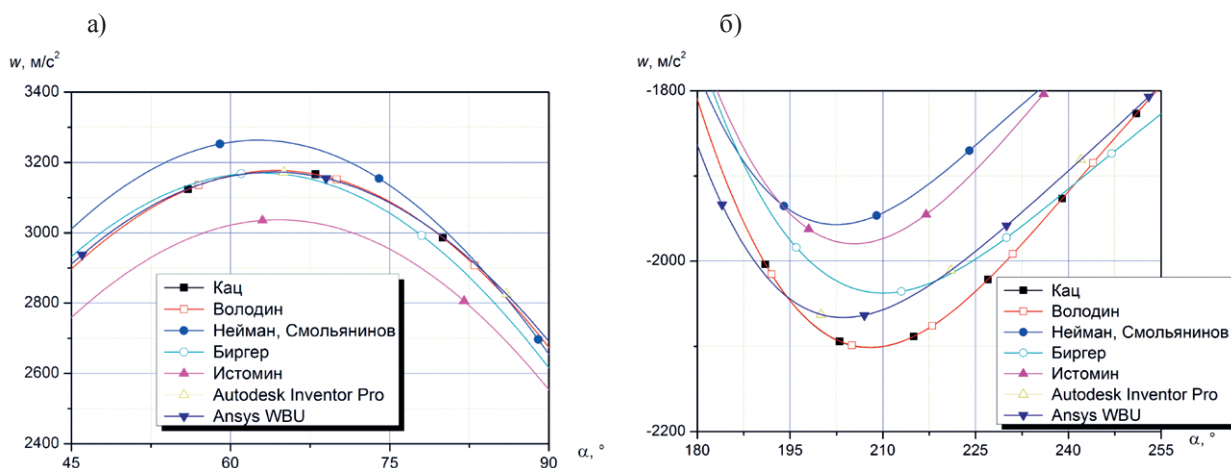


Рис. 7. Результаты аналитического и численного расчета ускорения прицепного поршня двигателя ЧН18/20 в области верхней (а) и нижней (б) мертвых точек

Следует заметить, что при этом результаты определения кинематических параметров прицепного поршня на основе численного моделирования практически совпадают (рис. 8, табл. 2).

Таблица 2

**Ускорение прицепного поршня двигателя ЧН18/20
при некоторых значениях угла поворота коленчатого вала, м/с²**

$\alpha, ^\circ$	Численные модели		Аналитические расчеты	
	Inventor	Ansys WBU	Максимум	Минимум
0	797,6	797,6	870,7	735,9
45	2911,2	2911,3	3010,9	2759,3
90	2691,2	2691,3	2674,3	2136,8
180	-1863,9	-1863,0	-1777,4	-1810,0

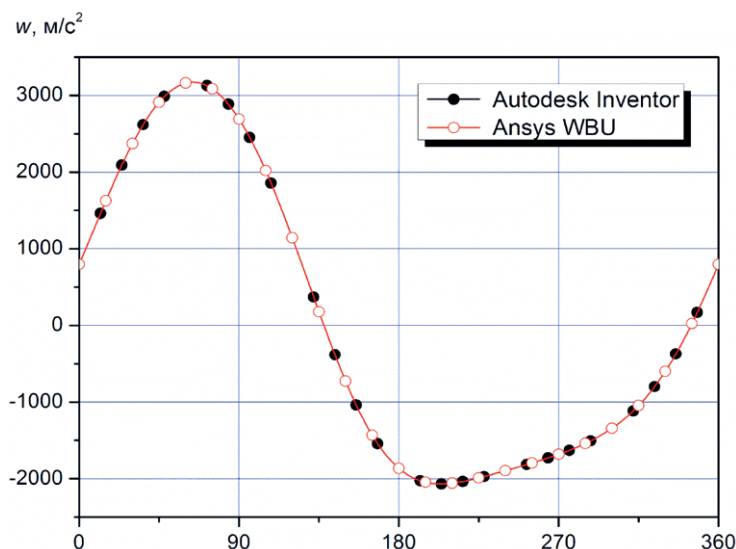


Рис. 8. Результаты численного расчета ускорения прицепного поршня двигателя ЧН18/20 в среде некоторых программных продуктов

Данное обстоятельство можно, по-видимому, объяснить тем, что при численном интегрировании уравнений движения в среде упомянутых программных продуктов учитываются не только низшие, но и высшие гармонические составляющие кинематических параметров прицепного поршня. Это подтверждается данными табл. 3, в которой представлены значения гармонических составляющих ускорения прицепного поршня дизеля, определенные по некоторым алгоритмам и при численном моделировании.

Практически тот же вывод был сделан по результатам расчетов и численного моделирования кинематики прицепного поршня двигателей другого назначения — тепловозного современного ЧН 26/26 (Россия, $R = 130$ мм, $L = 580$ мм, $r = 170$ мм, $l = 414$ мм, $\gamma = 42^\circ$, $\gamma_l = 40^\circ$, $n = 1000$ мин⁻¹) и авиационного Curtiss Conqueror V-1570 (США, 1924 – 1933 гг.; $R = 79,37$ мм, $L = 254$ мм, $r = 64,25$ мм, $l = 192,8$ мм, $\gamma = 60^\circ$, $\gamma_l = 66,5^\circ$, $n = 2400$ мин⁻¹) [16]. Расхождение величины ускорения прицепного поршня для некоторых значений угла поворота вала достигает 500 ... 750 м/с² для двигателя ЧН18/20; 100 ... 450 м/с² для двигателя ЧН26/26 и 1000 ... 1500 м/с² для двигателя Curtiss Conqueror¹. Такое различие в определении сил инерции способно приводить уже к погрешности вычисления нагрузок на шейки и подшипники двигателя.

Таблица 3

Гармонические составляющие A_k ускорения прицепного поршня дизеля ЧН18/20, м/с²

Алгоритм расчета, программный продукт	Порядок гармоники k			
	1	2	3	4
А. М. Кац	2540,9	658,6	–	–
И. А. Биргер	2540,2	641,5	–	–
П. А. Истомина	2396,5	662,8	–	–
А. И. Володин	2540,9	658,2	–	–
И. Ш. Нейман, Н. К. Смольянинов	2515,2	756,0	–	–
Autodesk Inventor	2542,0	686,2	19,2	28,9
Ansys WBU	2542,0	686,2	19,2	28,8

Примечание: Вычисленные значения составляющих ускорения третьего и четвертого порядков в выделенных цветом столбцах таблицы находятся в интервале 0,000008 ... 0,000024. По-видимому, такие значения могут быть отнесены к погрешностям вычислений.

¹ По данным В. Н. Ширяева, максимальные газовые силы в двигателе Curtiss Conqueror достигали 48 кН. При значении ПДМ, связанной с прицепным поршнем, равном 1,76 кг (данные В. Н. Ширяева), силы инерции ПДМ могут отличаться (при расчетах по разным алгоритмам) на 3 ... 5 кН.

Полученные результаты позволяют заключить, что выбору расчетных алгоритмов следует уделить серьезное внимание. Учитывая современные возможности вычислительной техники и развитие специализированного программного обеспечения, возможно, следует рекомендовать более широкое использование для определения кинематических параметров прицепных поршней КШМ (а также для исследования механизмов, отличных от КШМ) методов численного моделирования динамики с последующим определением соответствующих гармонических составляющих. Более широкое применение CAD/CAE-технологий для проведения кинематического и динамического анализа кривошипно-шатунных механизмов двигателей внутреннего сгорания позволит с большей точностью выполнять прочностные расчеты и повысит качество проектирования. Возможно, учитывая современный уровень развития измерительной техники, полезной для подтверждения достоверности расчетов может оказаться соответствующая опытная проверка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нейман И. Ш.* Динамика и расчет на прочность авиационных моторов: справочник / И. Ш. Нейман. — М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР. Государственное авиационное и автотракторное изд-во, 1933. — 262 с.
2. *Биргер И. А.* Авиационные поршневые двигатели: кинематика, динамика и расчет на прочность / И. А. Биргер, Н. И. Дружинин, В. К. Житомирский [и др.]. — М.: Государственное изд-во оборонной промышленности, 1950. — 870 с.
3. *Истомин П. А.* Динамика судовых двигателей внутреннего сгорания / П. А. Истомин. — Л.: Судостроение, 1966. — 280 с.
4. *Холмаков И. И.* Динамика авиационных двигателей / И. И. Холмаков. — М.-Л.: Государственное изд-во оборонной промышленности, 1938. — 148 с.
5. *Бортников М. Т.* Авиационные двигатели / М. Т. Бортников, В. Д. Владимиров, Ю. В. Вульфвич [и др.]. — М.: Машгиз, 1951. — 244 с.
6. *Berkemer J.* Fortschritte in der gekoppelten Simulation von Maschinendynamik und Antriebsregelung / J. Berkemer // Fortschritte in der Regelungs- und Antriebstechnik, Lageregelungseminar. — Stuttgart, 2004.
7. *Махов А. А.* Моделирование механических систем с помощью пакета расширения SimMechanics [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://exponenta.ru/educat/systemat/mahov/simmechanics.asp> (дата обращения: 17.12.2015).
8. *Львов Е. Д.* Динамика поршневых двигателей / Е. Д. Львов. — М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР. Главная редакция автотракторной литературы, 1936. — 274 с.
9. *Найденко О. К.* Динамика корабельных энергетических установок с двигателями внутреннего сгорания / О. К. Найденко. — Л.: Изд-во ВМА, 1974. — 538 с.
10. *Андреевский Н. А.* Дизели: Справочное пособие конструктора / Н. А. Андреевский, С. М. Баранов, В. А. Ваншейдт [и др.]. — М.-Л.: Машгиз, 1957. — 442 с.
11. *Володин А. И.* Локомотивные двигатели внутреннего сгорания / А. И. Володин. — М.: Транспорт, 1979. — 239 с.
12. *Григорьев Е. А.* Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма двигателя / Е. А. Григорьев. — Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2004. — 105 с.
13. *Семенов М. В.* Уравновешивание механизмов авиационных моторов / М. В. Семенов. — Л.: Изд-во ЛКВВИА, 1947. — 122 с.
14. *Горобцов А. С.* Расчетные задачи динамики систем твердых и упругих тел в программном комплексе ФРУНД / А. С. Горобцов, С. В. Солоденков // Машиностроение и инженерное образование. — 2008. — № 4. — С. 31–38.
15. *Яманин А. И.* Программные продукты для исследования динамики механических систем / А. И. Яманин // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2004. — № 1. — С. 34–40.
16. *Ширяев В. Н.* Кинематика, динамика и расчет на прочность кривошипного механизма авиадвигателя Кертисс Конкверор / В. Н. Ширяев. — М.-Л.: Отдел изд-ва Наркомвоенмора, 1933. — 139 с.

THE ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR CALCULATION OF KINEMATICS OF CRANKSHAFT-ROD MECHANISM WITH THE COUPLED CONNECTING-RODS

The article is devoted to comparative estimation of different calculation methods for kinematic analysis of crankshaft-rod mechanism. Calculation of kinematic parameters of coupling pistons in crankshaft-rod mechanism of V-model engines by different analytical algorithms can lead to significant differences of results. It will be cause of low exactness of dynamic analysis of mechanism and calculation of detail's mechanical strength. Displacement of piston, it's acceleration and harmonic composition of acceleration were received with using of different analytical methods and methods of numerical simulation. Calculations and comparative of results were realized for crankshaft-rod mechanism of ship diesel engine M400. The effectiveness of numerical models and analysis of crankshaft-rod mechanism by methods and means of modern CAD/CAE-technologies was shown on the basis of comparative of result's inaccuracy. Application of methods and means of modern CAD/CAE-technologies guarantee supply of increase exactness of kinematic, dynamic, detail's mechanical strength and quality of designing of internal combustion engines.

Keywords: Slave connecting crankshaft-rod mechanism, coupling rod, piston, analytical algorithm, numerical simulation and analysis, displacement, acceleration of piston, ship diesel engines, CAD/CAE-technologies.

REFERENCES

1. Neyman, I. Sh. *Dinamica I raschet na prochnost aviacionnykh motorov: Spravochnik*. M.-L.: ONTI NKTP SSSR – Gosudarstvennoe aviacionnoe I avtotractornoe izdatilstvo, 1933.
2. Birger, I. A., N. I. Druzhinin, M. K. Zhitomirsky, et al. *Aviacionnye porshnevye dvigateli: Kinematika, dinamika I raschet na prochnost*. M.: Gosudarstvennoe izdatelstvo oboronnoy promyshlennosti, 1950.
3. Istomin, P. A. *Dinamika cudovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya*. L.: Sudostroyeniye, 1966.
4. Kholmakov, I. I. *Dinamika aviacionnykh dvigateley*. M.-L.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoy promyshlennosti, 1938.
5. Bortnikov, M. T., V. D. Vladimirov, Yu. V. Vul'fovich, et al. *Aviacionnye dvigateli*. M.: Mashgiz, 1951.
6. Berkemer J. "Fortschritte in der gekoppelten Simulation von Maschinendynamik und Antriebsregelung." Fortschritte in der Regelungs-und Antriebstechnik, Lageregelseminar. Stuttgart, 2004.
7. Makhov, A. A. Modelirovanie mekhanicheskikh system s pomoshyu paketa rsshireniya SimMechanics. Web. 17.12.2015 <<http://exponenta.ru/educat/systemat/mahov/simmechanics.asp>. – 2009>.
8. Lvov, E. D. *Dinamika porshnevnykh dvigateley*. M.-L.: ONTI NKTP SSSR – Glavnaya redakciya avtotractornoy literatury, 1936.
9. Naydenko, O. K. *Dinamika korabelnykh jenergeticheskikh ustanovok s dvigateljami vnutrennego sgoraniya*. L.: Izd-vo VMA, 1974.
10. Andreyevsky, N. A., S. M. Baranov, V. A. Vansheydt, et al. *Dizeli: Spravochnoye posobie konstruktora*. L.: Mashgiz, 1957.
11. Volodin, A. I. *Locomotivnye dvigateli vnutrennego sgoraniya*. M.: Transport, 1979.
12. Grigor'ev, E. A. *Kinematika I dinamika krivoshipno-shatunnogo mehanisma dvigatelya*. Volgograd: Izd-vo VGTU, 2004.
13. Semenov, M. V. *Upravnyeshivanie mehanismov avacionnykh motorov*. L.: Izd-vo LKVVIA, 1947.
14. Gorobtsov, A.S., and S. V. Solodyonkov. "FRUND - the Software Package for the Dynamic Simulation of the Rigid and Flexible Bodies Systems." *Mechanical Engineering and Engineering Education* 4 (2008): 31–38.
15. Yamanin, A. I. "Programmnye produkty dlya issledovaniya dinamiki mekhanicheskikh system." *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* 1 (2004): 34–40.
16. Shiryayev, V. N. *Kinematika, dinamika I raschet na prochnost krivoshipnogo mehanisma aviamotora Curtiss Conqueror*. M.-L.: Otdel izdatelstva Narkomvoenmora, 1933.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Яманин Александр Иванович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ЯГТУ»
yamaninai@ystu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhukov Vladimir Anatolevich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Yamanin Alexander Ivanovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Yaroslavl State Technical University
yamaninai@ystu.ru

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2016 г.

УДК 621. 830. 62

**Е. Н. Андрианов,
А. Н. Иванов**

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ КРАНОВЫХ И СУДОВЫХ ПРИВОДОВ

В статье рассматриваются приводы, содержащие планетарно-дифференциальные механизмы, которые обеспечивают разделение общей мощности одного двигателя на два потока с заданным соотношением крутящих моментов и частоты вращения выходных валов. Подобные приводы машин позволяют не только уменьшить размеры и общую массу привода и сопряженных с ним узлов, но и существенно расширить их функциональные свойства. В общем случае, проектирование распределителя решается таким образом, чтобы конструктор, выбрав ту или иную схему, знал, что он не упустил более простой или более удовлетворяющей назначению схемы. С этой целью создан список структур распределителя и получены зависимости с применением безразмерных силовых и скоростных параметров, определяющие их общие свойства. Изложенные принципы проектирования могут быть использованы при создании специальных крановых и судовых механизмов.

Ключевые слова: распределитель момента, структура, проектирование, планетарный механизм, дифференциальная передача, механизм передвижения, крутонаклонные конвейеры, гребные винты противоположного вращения.

С ВНЕДРЕНИЕМ в приводы машин дифференциально-планетарных передач появилась возможность не только уменьшить размеры и общую массу привода и сопряженных с ним узлов, но и существенно расширить их функциональные свойства. В частности, дифференциальные механизмы исключают циркуляцию энергии и пробуксовку ленты в конвейерах с двухбарабанным приводом [1]; исключают циркуляцию энергии и проскальзывание ходовых колес в механизмах передвижения машин, резко уменьшая износ ходовых колес из-за различия средних значений радиусов катания [2] – [4]; позволяют учитывать несоответствия линейных скоростей и тяговых усилий грузонесущих элементов, вследствие вытяжки и износа цепи и ленты ленточно-цепного крутонаклонного конвейера [5].

Использование дифференциальных механизмов для привода соосных винтов противоположного вращения в главных судовых установках обеспечивает их более высокую гидродинамическую эффективность и устойчивость к кавитации по сравнению с одиночным винтом равного диаметра [6] – [8]. В частности, огромный интерес у участников Международной выставки судостроительной промышленности и морского дела, которая проходила в Афинах с 2 по 6 июня 2014 г.

вызвала постройка японской компанией *JMU* судна с силовой установкой, использующей один двигатель для привода двух соосных винтов, вращающихся в противоположных направлениях на одном гребном валу. По заявлению *JMU*, благодаря использованию соосных гребных винтов противоположного вращения и дополнительно новым сопутствующим технологиям судно сможет сократить расход топлива на 16 % [9], [10].

В конструктивном отношении распределительные механизмы дают возможность найти более рациональную компоновку привода как в случае параллельно расположенных приводных валов, так и при соосном их расположении, улучшают экономичность, повышают надежность привода. Отметим, что указанные преимущества могут быть реализованы лишь при выборе рациональной схемы подобных устройств. В частности, разработка проекта компанией *JMU* была завершена еще в 1984 г. (см., например, [9]). Однако широкое использование такого вида движителя было ограничено из-за сложности производства надежного редуктора, способного передавать большую мощность. Тем не менее, проектировщикам нужно иметь в виду, что надежное дешевое конкурентоспособное изделие создать невозможно [11]. Для краткости далее распределительный механизм будем называть распределителем.

Основные конструктивно-компоновочные решения. На структурную схему, сложность и организацию конструкции распределителя существенно влияет расположение приводных валов. Основные виды компоновок распределителей, которые выдвинула практика эксплуатации, приведены на рис. 1.

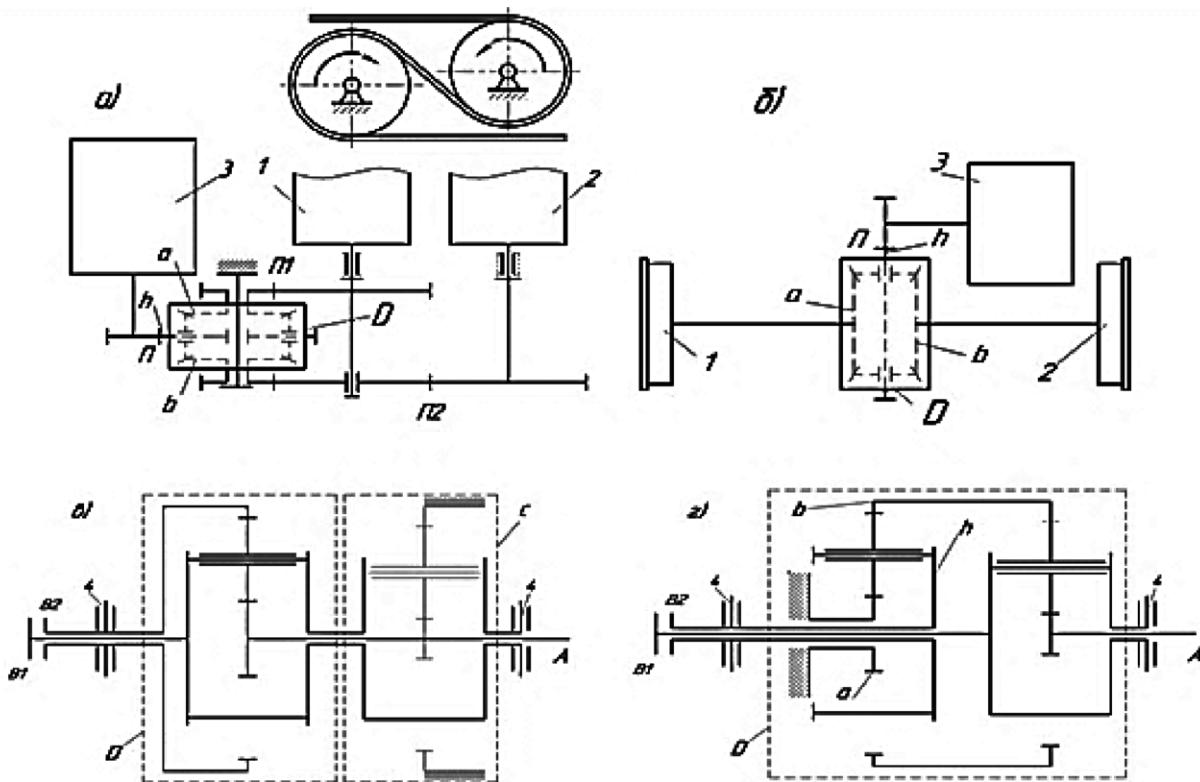


Рис. 1. Кинематические схемы распределительного механизма

- a* — двухбарабанная лебедка конвейера; *б* — устройство передвижения мостового крана;
в — привод соосных гребных винтов противоположного вращения с синхронизирующей ступенью;
г — то же, без уточнения системы синхронного вращения

В схеме рис. 1, *a* несоосное расположение барабанов 1 и 2 потребовало приведения их в движение от двигателя 3 через передачу П, водило *h* конического дифференциала *D* и передачи П1 и П2. Равенство окружных усилий на барабанах одинаковых диаметров обеспечено одинаковостью моментов на звеньях *a* и *b* дифференциала *D*, при этом передаточные отношения передач П1

и $П2$ отличаются только знаком [1]. При шести $n_o = 6$ подвижных основных звеньях ($1, 2, 3, a, b, h$) и четырех $k_m = 4$ механизмах ($П, П1, П2, D$) на основании формулы

$$W = n_o - k_m \quad (1)$$

схема имеет две $W = 2$ степени свободы [12]. Заметим, что в работах [13], [14] число степеней свободы определяют числом ведомых звеньев: при двух независимых ведомых звеньях механизмы обладают двумя степенями свободы. Внешняя связь в виде конвейерной ленты, охватывающей оба барабана, задает определенное кинематическое соотношение между угловыми скоростями двух ведомых звеньев.

В схеме рис. 1, б одинаковое направление моментов и соосное расположение ходовых колес позволило исключить передачи $П1$ и $П2$ [4] и этим упростить конструкцию привода. При $n_o = 4$ (подвижные звенья $1, 2, 3, h$) и $k_m = 2$ (механизмы $П$ и D) схема также имеет две степени свободы. Равенство окружных усилий на ходовых колесах 1 и 2 обеспечивает дифференциал D . Внешняя связь в виде подкранового пути обуславливает соотношение скоростей ходовых колес, катящихся по подкрановому пути. В схемах крановых механизмов применен конический дифференциал автомобильного типа, имеющий ограниченные возможности с точки зрения передаточного числа и отличающийся сложностью монтажа и недостаточной прочностью узлов.

Схемы рис. 1, в, г представляют распределительные механизмы судовых агрегатов для привода гребных винтов противоположного вращения (ВПВ).

В схеме рис. 1, в синхронное вращение ВПВ обеспечено путем присоединения к дифференциалу D дополнительной синхронизирующей ступени C с фиксированным передаточным отношением. Синхронизировать вращение гребных винтов с целью уменьшения колебания их суммарного упора, передаваемого на корпус судна, рекомендовано в работе [10]. В этом случае конструкция при трех основных звеньях (A, B_1, B_2) и двух механизмах (D, C) на основании формулы (1) имеет $W=1$, а необходимое соотношение крутящих моментов в схемах с $W=1$ обеспечивают путем подбора характеристики гребных винтов (направление и шаг лопастей). Данная схема запатентована фирмой «Берг-Хютте-Зонтхофен» [15].

Схема рис. 1, г при четырех основных звеньях (A, B_1, B_2, b) и двух механизмах, образующих дифференциал D , на основании формулы (1) имеет $W=2$. Схема опубликована шведской фирмой «Сталь-Лаваль» [16]. Синхронное вращение ВПВ в данной конструкции можно обеспечить путем присоединения к дифференциалу D дополнительной ступени, аналогичной, например, той, которая имеет место в схеме рис. 1, в. Обе конструкции в конструктивно-компоновочном плане допускают размещение внешних главных упорных подшипников на валах ВПВ. Кроме того, в них применены планетарные механизмы $2k-h$ типа A (по классификации работ [12], [17], [18]). Они содержат два центральных колеса a и b , зацепляющиеся с сателлитами водила h (рис. 1, г). Подобные механизмы наиболее выгодны с точки зрения передаточного числа, простоты в конструктивно-технологическом плане, способны передавать большую мощность и на этом основании получили подавляющее применение в мощных силовых приводах.

Таким образом, при проектировании крановых механизмов конструктор сталкивается с несоосным расположением приводных валов, наличием внешней связи и дополнительных передач, реализующих требуемые компоновочные ограничения. Для судовых агрегатов привода ВПВ характерно соосное расположение рабочих валов распределителя, наличие синхронизирующей ступени с фиксированным передаточным отношением.

Представление структуры распределителя. Структурой подобных распределителей занимались многие авторы (см. например, [5], [7], [8]). Однако большинство работ посвящено исследованию уже существующих схем, вопросы же, касающиеся нахождения новых структур, рассматривались сравнительно мало [6], [9], [14], [17]. В работе [14] предложен прием, сочетающий математические и графические методы построения структур и выбора схем для всех возможных сочетаний трехколесных механизмов (по терминологии [14]); в работе [17] для получения структур предложены области рационального существования, ограниченные линиями

предельных значений параметров для схем $2k - h$; в работах [6], [9] предложены частные решения для распределителей заданной структуры применительно к соосным винтам противоположного вращения главных судовых приводов. В данной статье, в отличие от ранее опубликованных по этому вопросу работ, сделана попытка решить поставленную задачу в наиболее общем виде.

Известны различные представления структуры распределителя, которые иллюстрирует рис. 2. На рис. 2, а приведено представление всех кинематических схем, изображенных на рис. 1 в виде одной обобщенной структурной схемы. Такое представление позволяет легко перевести задачу с предметного языка на язык прикладной математики. В частности, в исследовании [19] при создании структуры используется гиперграф $H = (X^z, U)$, где X^z — множество вершин, совпадающее с множеством звеньев механизма; U — множество ребер, в котором каждое ребро соответствует составной части (рис. 2, б, в). Гиперграф может быть представлен обычным или двудольным графом. Данное представление (рис. 2, з, д) нашло отражение в работе [20]; подробнее о представлении структур см. [21]. Далее вопрос синтеза излагается на основе структурной схемы, получившей наиболее широкое применение в инженерной практике.

Создание списка структур распределителя. При создании структуры использован способ инверсии. В качестве составной части структуры выбран отдельный планетарный механизм с тремя соосными звеньями, а также зубчатые передачи с двумя или несколькими неподвижными осями валов. Связи между механизмами устанавливаются жестким соединением их звеньев. Для исследуемого класса распределителей пригодны структуры дифференциала D , содержащие не более двух планетарных механизмов.

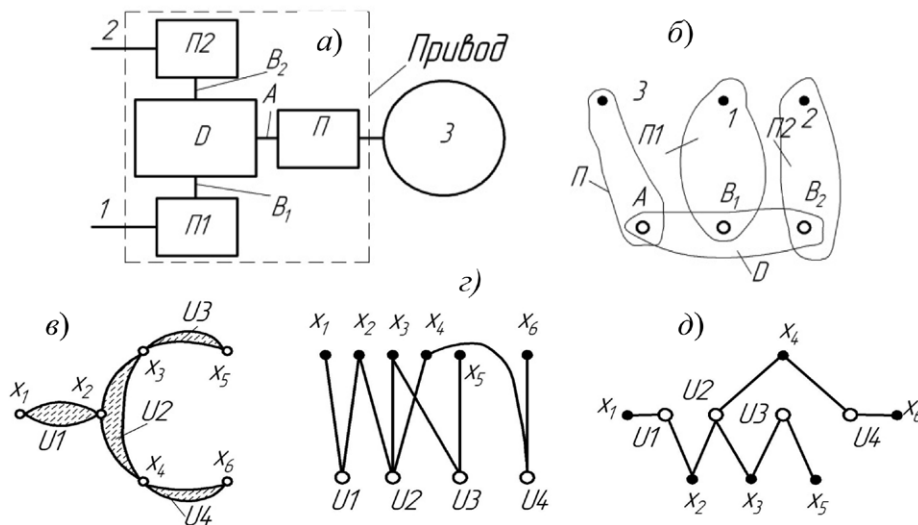


Рис. 2. Представления структуры распределительного механизма
 а — обобщенная структурная схема;
 б, в — гиперграф с вершинами-звеньями; г — двудольный граф;
 д — вариант укладки двудольного графа на плоскости

Распределитель содержит три подвижных рабочих звена — ведущее звено A и ведомые звенья 1 и 2 . При двух планетарных механизмах всевозможные исходные структурные цепи, отвечающие уравнению (1), представлены на рис. 3 и различаются числом степеней свободы. Структурные цепи по схеме рис. 3 а, б, имеют две степени свободы, а схема рис. 3, в — три степени свободы и четыре свободных звена. Вводя в цепи по схеме рис. 3, а, б обозначения ведущего A , ведомых B_1 и B_2 при $W = 2$ семи возможными способами, получаем все множество структурных схем

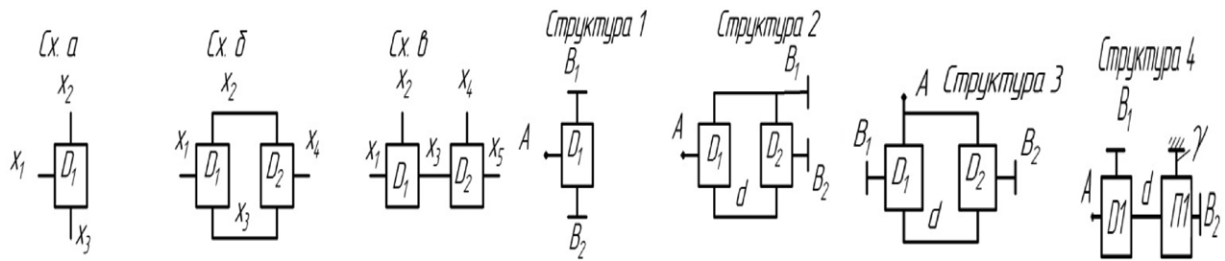


Рис. 3. Образование структур дифференциала D распределителя

дифференциала D (структуры 1, 2, 3 на рис. 3). Поступая аналогично со схемой рис. 3, в, и вводя одно опорное звено g , получаем структуру 4 распределителя. Заметим, что структуру 4 можно рассматривать и как образование, полученное присоединением к структуре 1 дополнительной передачи III. Все полученные структуры можно представить в виде одной обобщенной структурной схемы (см., например, рис. 2, а), в которой для общности решения к звеньям A, B_1, B_2 присоединены дополнительные передачи.

Общие свойства распределителя. Пусть M_A, M_1, M_2 — вращающие моменты, действующие извне на звенья $A, 1$ и 2 (рис. 2, а). Распределитель (если не учитывать трение) должен создавать в общем случае при равномерном движении между этими моментами соотношения

$$M_2 = RM_1 \text{ и } M_1 = i_{p1} M_A, \quad (2)$$

где i_{p1} — некоторое наперед заданное число, которое может быть как положительным, так и отрицательным; при этом отношения скоростей вращения валов должны удовлетворять заданному отношению

$$S = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (3)$$

где R и S — параметры распределения соответственно моментов и скоростей между валами распределителя, значения которых определяются условиями работы машины.

В случае пренебрежения потерями, что вполне допустимо на стадии проектирования, для дифференциальной передачи, используя принцип возможных перемещений, можно написать уравнение мощностей

$$M_A \omega_A + M_1 \omega_1 + M_2 \omega_2 = 0.$$

С учетом равенств (2), (3) это уравнение представим в виде

$$M(\omega_A + i_{p1} \omega_1 + RS i_{p1} \omega_1) = 0.$$

Имея в виду, что $M_A \neq 0$, получим, заменяя обозначение ω на n , искомую зависимость между скоростями подвижных рабочих звеньев распределителя

$$n_A = -i_{p1}(n_1 + RS n_1). \quad (4)$$

Отражая в верхней части символа i_{A1} условия, при которых происходит работа распределителя, из уравнения (4) получаем связь

$$\frac{n_A}{n_1} = i_{A1}^{(S n_1 = n_2)} = -i_{p1}(1 + RS).$$

Частота вращения валов определяется условиями работы машины и может быть задана непосредственно или в виде их отношения. В этом случае передаточные отношения распределителя i_{p1} и i_{p2} определяются следующим образом:

$$i_{p1} = -\frac{i_{A1}^{(S n_1 = n_2)}}{1 + RS}; \quad i_{p2} = R i_{p1}.$$

Особенно часто в рассматриваемых областях промышленности встречаются механизмы, имеющие при одном ведущем звене два ведомых звена и создающие на них равные между собой вращающие моменты, причем при одинаковом направлении вращения выходных валов $n_{B_1} = n_{B_2}$: $S = 1, R = 1$; при противоположном направлении вращения выходных валов $n_{B_1} = -n_{B_2}$: $S = -1, R = -1$. В обоих случаях $RS = 1$ и представляет собой параметр распределения мощностей. В СЭУ по данным работы [10] из-за различия в условиях обтекания гребных винтов ВПВ выдерживают $R = -(1 \dots 1,3)$. Поскольку работа распределителя в отмеченных случаях происходит при равном распределении мощностей $RS \approx 1$, то *передаточное отношение каждой редукторной ветви* (значения частот вращения выходных валов при этом оказываются близкими $n_1 \approx n_2$):

$$i_{p1} = i_{p2} = i_p = 0,5i_{A1}^{(n_1 \approx n_2)} \quad (5)$$

будет в два раза меньше общего передаточного отношения распределителя. Частота вращения звеньев дифференциала, структурные схемы которого показаны на рис. 3, связаны уравнением кинематики

$$n_A = i_{AB_1}^{B_2} n_{B_1} + (1 - i_{AB_1}^{B_2}) n_{B_2}. \quad (6)$$

Определение параметров структурной схемы. Если в качестве распределителя использовать *структуру 1* или *структуру 4*, содержащие один дифференциальный механизм $2k - h$ типа A , то, в связи с конструктивными ограничениями передаточного отношения данного механизма, число $|i_p|$ желательнее назначать не больше 9. Вообще говоря, в технике приводов, использующих планетарные механизмы $2k - h$ типа A , конструктивный параметр p назначают $1,5 \leq p = \frac{z_b}{z_a} = -i_{ab}^h \leq 11$,

где i_{ab}^h — передаточное отношение от звена a к звену b в движении относительно водила h ; z_a, z_b — число зубьев центральных колес a и b . Однако по конструктивным причинам, связанным, в частности, с недостаточным диаметром оси сателлита, используемой для его опоры при малых p , или с пониженной крутильной жесткостью центрального колеса a , при высоких значениях p , сужают интервал конструктивного параметра до значений $2 \leq p \leq 8$. Заметим, что при конструировании значение p может быть подчинено дополнительным компоновочным требованиям: например, если через внутреннее отверстие центрального колеса a должен проходить вал соседней ступени, то параметр p ограничивают значением $p \leq 3$ [4]. Таким образом, общее передаточное отношение распределителя можно назначать до значения $2|i_p| = 2(p + 1) \leq 18$.

С другой стороны, из условия равновесия дифференциала $M_A + M_{B_1} + M_{B_2} = 0$ следует, что вращающие моменты на его выходных валах не могут быть равными и различаются на величину вращающего момента на входном валу. Поэтому равенство $|R| = 1 \dots 1,3$ можно обеспечить, вводя в одну из ветвей дифференциала дополнительную передачу (см., например, *структуру 4*). Поскольку $M_{B_1} = -M_A i_{AB_1}^d$, $M_{B_2} = -M_A i_{Ad}^{B_1} i_{dB_2}^\gamma$ передаточное отношение $i_{dB_2}^\gamma$ передачи III с учетом (2) определится из равенства

$$i_{dB_2}^\gamma = -\frac{Ri_{AB_1}^d}{1 - i_{AB_1}^d}.$$

Пример расчета. В механизме передвижения специального мостового трехбалочного магнитно-грейферного крана для Новолипецкого металлургического комбината была задана частота вращения двигателя, равная 710 об/мин и ходового колеса 45 об/мин. Расположение двух приводных валов в тележке несоосное.

Принимая $n_A = 710$ об/мин, $n_1 = 45$ об/мин, находим $i_{A1}^{(S_{n_1 \approx n_2})} = 710 / 45 \approx 16$. Тогда передаточное отношение $i_p = 0,5i_{A1}^{(n_1 \approx n_2)} = 0,5 \cdot 16 = 8$, которое, на основании сказанного, реализовано в дифференциале, состоящем из одного однорядного механизма типа $2k - h$. Заменяя в рассмотренном примере символы A, B_1, B_2 соответственно на символы a, h, b передаточное отношение передачи III определится при $R = 1$ отношением $i_{dB_2} = \frac{1+p}{p}$ и будет, при $p = i_p - 1 = 7$, равным $i_{dB_2} = \frac{8}{7}$. Это передаточное отношение получаем в передаче III с неподвижными осями. Передача III структуры 4 должна содержать нечетное число зацеплений, чтобы обеспечить валам B_1 и B_2 вращение в одном направлении, так как водило B_1 и эпицикл d на основании (6) вращаются в разных направлениях.

Конструкция распределителя создана с применением плавающих звеньев [22] – [24]. Применение химико-термических обработок анализировалось по результатам работ [25], [26].

Для создания распределителей с большими значениями $2|i_p|$ следует либо вводить в схему дополнительные передачи (рис. 2, а), либо переходить к схемам с двумя однорядными механизмами типа $2k - h$. В случае установки перед дифференциалом дополнительной передачи II (рис. 2, а) следует проектировать систему с параметрами распределителя до передачи II .

В заключение отметим следующее.

В работе дается литературный обзор схемно-конструктивных решений распределительных механизмов с двумя степенями свободы, нашедших применение в крановых и судовых механизмах и позволяющих не только уменьшить размеры и общую массу привода и сопряженных с ним узлов, но и существенно расширить их функциональные свойства. В конструктивном отношении распределитель моментов дает более рациональную компоновку привода, сложность которого во многом определяется расположением приводных валов, приводящих к необходимости введения в механизм дополнительных передач. Поэтому разработчику еще на начальной стадии создания проекта следует учитывать и формировать компоновочные условия.

В статье методом инверсии получен список всевозможных структур распределителя. Сформулированы их общие свойства с применением безразмерных силовых и скоростных параметров, определяемых условиями работы машины. Общие свойства в сочетании со списком всевозможных структур образуют метод формирования схемно-компоновочных решений распределителей. Приведен пример, иллюстрирующий метод синтеза распределителя применительно к механизму передвижения мостового крана большой грузоподъемности.

Показана возможность представления структур на основе двудольных графов. Использование двудольных графов в процессе проектирования позволит перевести задачу с предметного языка на язык прикладной математики. Данная задача требует дальнейшей разработки и создания топологического метода синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнев А. Ф. Словарь-справочник по механизмам / А. Ф. Крайнев. — М.: Машиностроение, 1987. — 560 с.
2. Бирюков И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. — М.: Транспорт, 1986. — 256 с.
3. Андрианов Е. Н. Резервы грузоподъемных машин / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов, С. Н. Федотов // Труды Междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2006.
4. Патент ФРГ №1 406 242 В 66 с. 35b, 1/22, от 26.03.70.
5. Пертен Ю. А. Крутонаклонные конвейеры / Ю. А. Пертен. — Л.: Машиностроение, 1977. — 216 с.
6. Пыж О. А. Редукторы судовых турбоагрегатов / О. А. Пыж, Л. М. Гаркави, Ю. А. Державец, Р. Р. Гальпер. — Л.: Судостроение, 1975. — 272 с.
7. ЦКБ «Черноморсудопроект» — Бюл. 9, 1993. Заявка SU 1801095 А3 кл. В 63 Н 23/28, 5/10.
8. Иванов А. Н. Выбор схем планетарных реверсивных редукторов и редукторов привода соосных гребных винтов противоположного вращения / А. Н. Иванов, Ю. А. Державец, А. Л. Филипенков // Труды XXV науч.-техн. конференции: сб. науч. тр. — Ч. 1. — Л.: Изд-во ЛИВТа, 1971. — С. 265–271.
9. Япония. The Motor ship. March 1989. Заявка № 59-8595 кл. В63 Н 23/28, опубл.1984.
10. Budd W. I. Main reduction gears for contra-rotation / W. I. Budd // Marine Technology. — 1969. — Vol. 6. — № 4. — Pp. 440–448.
11. Остяков Ю. А. Проектирование деталей и узлов конкурентоспособных машин / Ю. А. Остяков, И. В. Шевченко. — СПб.: Лань, 2013. — 336 с.
12. Кирдяшев Ю. Н. Проектирование сложных зубчатых механизмов / Ю. Н. Кирдяшев, А. . Иванов. — Л.: Машиностроение, 1973. — 352 с.
13. Коловский М. З. Теория механизмов и машин: учеб. пособие / М. З. Коловский, А. Н. Евграфов [и др.]. — 2-е изд., испр. — М.: Изд. центр «Академия», 2008. — 560 с.

14. Крейнес М. А. Зубчатые механизмы. Математические основы выбора оптимальных схем / М. А. Крейнес, М. С. Розовский. — М.: Изд-во МГУ, 1965. — 336 с.
15. Gears for contra-rotating propellers // Marine Engineer and Naval Architect. — 1971. — Vol. 94. — №. 1138. — Pp. 42.
16. Jung I. Swedish research on contra-rotating propellers / I. Jung // Marine Engineer and Naval Architect. — 1967. — Vol. 90. — №. 1101. — Pp. 530–533.
17. Волков Д. П. Планетарные, волновые и комбинированные передачи строительных и дорожных машин / Д. П. Волков, А. Ф. Крайнев. — М.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
18. Бильдюк Н. А. Детали машин: учебник / Н. А. Бильдюк, С. И. Каратушин, А. Л. Филипенков [и др.]. — СПб.: Политехника, 2015. — 695 с.
19. Сушков Ю. А. Графы зубчатых механизмов / Ю. А. Сушков. — Л.: Машиностроение, 1983. — 216 с.
20. Кудрявцев В. Н. Планетарные передачи: справочник / В. Н. Кудрявцев, Ю. Н. Кирдяшев, Ю. А. Державец [и др.]. — Л.: Машиностроение, 1977. — 536 с.
21. Барышников С. О. Обзор методов представления структуры зубчатых механизмов / С. О. Барышников, А. Н. Иванов // Морской вестник. — 2011. — № 2. — С. 108–110.
22. Андриенко Л. А. Детали машин: учебник для вузов / Л. А. Андриенко, Б. А. Байков, И. К. Ганулич [и др.]. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 543 с.
23. Гаркунов Д. Н. Триботехника: учеб. пособие / Д. Н. Гаркунов, Э. Л. Мельников, В. С. Гаврилюк. — 2-е изд., стер. — М.: КНОРУС, 2013. — 408 с.
24. Кудрявцев В. Н. Расчет и проектирование зубчатых редукторов / В. Н. Кудрявцев, И. С. Кузьмин, А. Л. Филипенков. — СПб.: Политехника, 1993. — 448 с.
25. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В. М. Зинченко. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 303 с.
26. Руденко С. П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С. П. Руденко, А. Л. Валько. — Минск: Беларуская навука, 2014. — 126 с.

GENERAL DESIGN ISSUES OF COMPETITIVE SCHEMES OF DISTRIBUTION MECHANISMS OF THE CRANE AND SHIP DRIVES

The article discusses the drives containing the planetary differential mechanisms, which ensure the separation of the total power in one engine on two threads with a given ratio of torque and rotational speed of the output shafts. Such actuators machines allow not only to reduce the size and overall weight of the actuator and its associated nodes, and to significantly extend their functional properties. In General, the design of the dispenser must be addressed so that the designer, selecting a particular scheme, knew that he did not miss a simpler or more satisfying assignment scheme. That end the list of structures of the distributor was created and the dependences with the use of dimensionless power and speed parameters that determine their overall properties were obtained. The principles of design can be used to create special crane and ship machinery.

Keywords: the distributor point, structure, design, planetary gear, differential gear, the mechanism of movement, high-angle conveyors, screw propellers of opposite rotation.

REFERENCES

1. Krajnev, A. F. *Slovar-spravochnik po mehanizamam*. М.: Mashinostroenie, 1987.
2. Birjukov, I. V., A. I. Beljaev, and E. K. Rybnikov. *Tjagovye peredachi jelektropodvizhnogo sostava zheleznyh dorog*. М.: Transport, 1986.
3. Andrianov, E. N., A. N. Ivanov, and S. N. Fedotov. “Rezervy gruzopodemnyh mashin.” *Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2006.
4. Federal Republic of Germany. Patent №1 406 242 B 66 c. 35b, 1/22. 26 March 1970.
5. Perten, Ju. A. *Krutonaklonnye konvejery*. L.: Mashinostroenie, 1977.
6. Pyzh, O. A., L. M. Garkavi, Ju. A. Derzhavec, and R. R. Galper. *Reduktory sudovyh turboagregatov*. L.: Sudostroenie, 1975.
7. СКВ «Chernomorsudoproekt», Bull. 9, 1993. Application SU 1801095 A3 cl. V 63 N 23/28, 5/10.

8. Ivanov, A. N., Ju. A. Derzhavec, and A. L. Filipenkov. "Vybor shem planetarnyh reversivnyh reduktorov i reduktorov privoda soosnyh grebnyh vintov protivopolozhnogo vrashhenija." *Trudy HHV nauchno-tehnicheskoy konferencii: sbornik nauchnyh trudov. Ch. 1.* L.: Izd-vo LIVTa, 1971: 265–271.
9. Japan. The Motor ship. Application № 59-8595 cl. B63 H 23/28, publ. 1984.
10. Budd, W. I. "Main reduction gears for contra-rotation." *Marine Technology* 6.4 (1969): 440–448.
11. Ostjakov, Ju. A., and I. V. Shevchenko. *Proektirovanie detalej i uzlov konkurentosposobnyh mashin.* SPb.: Izdatelstvo «Lan», 2013.
12. Kirdjashev, Ju. N., and A. N. Ivanov. *Proektirovanie slozhnyh zubchatyh mehanizmov.* L.: Mashinostroenie, 1973.
13. Kolovskij, M. Z., A. N. Evgrafov, et al. *Teorija mehanizmov i mashin: uchebn. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij. 2-e izd., ispr. M.: Izd. Centr «Akademija», 2008.*
14. Krejnes, M. A., and M. S. Rozovskij. *Zubchatye mehanizmy. Matematicheskie osnovy vybora optimalnyh shem.* M.: Izd. MGU, 1965.
15. "Gears for contra-rotating propellers." *Marine Engineer and Naval Architect* 94.1138 (1971): 42.
16. Jung, I. "Swedish research on contra-rotating propellers." *Marine Engineer and Naval Architect* 90.1101 (1967): 530–533.
17. Volkov, D. P., and A. F. Krajnev. *Planetarnye, volnovye i kombinirovannye peredachi stroitelnyh i dorozhnyh mashin.* M.: Mashinostroenie, 1968.
18. Bildjuk, N. A., S. I. Karatushin, A. L. Filipenkov, et al. *Detali mashin: uchebnik.* SPb.: Politehnika, 2015.
19. Sushkov, Ju. A. *Grafy zubchatyh mehanizmov.* L.: Mashinostroenie, 1983.
20. Kudrjavcev, V. N., Ju. N. Kirdjashev, Ju. A. Derzhavec, E. G. Ginzburg, A. N. Ivanov, et al. *Planetarnye peredachi: Sprav.* L.: Mashinostroenie, 1977.
21. Baryshnikov, S. O., and A. N. Ivanov. "Obzor metodov predstavlenija struktury zubchatyh mehanizmov." *Morskoy vestnik* 2 (2011): 108–110.
22. Andrienko, L. A., B. A. Bajkov, I. K. Ganulich, et al. *Detali mashin: ucheb. dlja vuzov.* M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2002.
23. Garkunov, D. N., Je. L. Melnikov, and V. S. Gavriljuk. *Tribotehnika: uchebnoe posobie.* M.: KNORUS, 2013.
24. Kudrjavcev, V. N., I. S. Kuzmin, A. L. Filipenkov. *Raschet i proektirovanie zubchatyh reduktorov.* SPb.: Politehnika, 1993.
25. Zinchenko, V. M. *Inzhenerija poverhnosti zubchatyh koles metodami himiko-termicheskoy obrabotki.* M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2001.
26. Rudenko, S. P., and A. L. Valko. *Kontaktная ustalost zubchatyh koles transmissij jenergonasysyhennyh mashin.* Minsk: Belaruskaja navuka, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрианов Евгений Николаевич —
кандидат технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
fkt_pt@gumrf.ru
Иванов Анатолий Николаевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
fkt_pt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrianov Evgenij Nikolaevich —
PhD, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
fkt_pt@gumrf.ru
Ivanov Anatolij Nikolaevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
fkt_pt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2015 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА ПОТОКОМ ИДЕАЛЬНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ СРЕДЫ ПРИ НАЛИЧИИ ЭКРАНИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА

Предложен аналитический метод решения плоской задачи обтекания кругового цилиндра установившимся потоком идеальной среды при наличии экранирующей поверхности. Метод основан на решении краевой задачи для уравнений установившегося движения идеальной несжимаемой среды при граничных условиях непроницаемости вдоль контуров обтекаемого цилиндра и экранирующей поверхности. В качестве определяющих уравнений использовался интеграл уравнений Эйлера для 2D установившегося движения идеальной несжимаемой среды. Решение задачи реализовано с применением асимптотических методов. В результате получены новые формулы, определяющие подъемную силу и лобовое сопротивление обтекаемого тела как функции исходных параметров, справедливые при малых размерах обтекаемого тела по сравнению с размерами набегающего потока. С помощью пакета стандартных программ Maple найдены значения этих величин при различных исходных параметрах и с учетом эффекта экранирования.

Ключевые слова: обтекание, круговой цилиндр, идеальная несжимаемая жидкость, экранирующая поверхность, уравнение, интеграл, подъемная сила, лобовое сопротивление, экранирующий эффект.

1. Экранопланы и экранолеты. По международной классификации (ИМО) экраноплан относится к многорежимным морским судам. Экраноплан — это перспективное транспортное средство, для которого в основном режиме эксплуатации движение происходит над водной поверхностью без контакта с ней, существенно используя при этом эффект экранирования («эффект экрана») [1] – [5]. Для экранолета возможен дополнительно и режим движения на значительном удалении от поверхности («самолетный режим»).

Основной принцип движения экраноплана можно сформулировать как выигрыш в подъемной силе за счет экранирующего эффекта. Экранирующий эффект, или эффект экранирования, был обнаружен в 30-х гг. XX в. результате экспериментальных исследований. Он состоит в том, что при движении потока в узком пространстве между обтекаемым телом и экраном (водной или земной поверхностью) возникает значительное увеличение подъемной силы, и движение может осуществляться в более экономичном режиме при значительной экономии топлива.

Экраноплан способен передвигаться на большие расстояния и на малой высоте над водной (земной или ледовой) поверхностью со скоростями порядка 400 – 600 км/ч. Достоинства экранопланов и экранолетов как поисковых, спасательных и экономичных транспортных средств очевидны. Производство, освоение и внедрение таких аппаратов органично вписываются в Морскую доктрину, представленную Президентом РФ летом 2015 г. Интерес к таким средствам передвижения проявляется со стороны различных Министерств РФ — Министерства транспорта, МЧС и Минвостокразвития. Однако серийное производство экранопланов и экранолетов в РФ пока не начато. Для организации такого производства требуются современные технологии, высокоточное оборудование и применение специальных конструкционных материалов. Немаловажен и теоретический аспект. Теория экранирующего эффекта на сегодняшний день разработана недостаточно. Теоретические исследования в этой области заметно отстают от потребностей практики.

Необходимо всестороннее теоретическое изучение экранирующего эффекта, которое позволит получить количественные зависимости, расчетные формулы и в конечном итоге позволит более точно рассчитывать основные элементы конструкции [6] – [8].

В данной работе предлагается рассмотрение теоретического аспекта проблемы с помощью модели обтекания кругового цилиндра при наличии экранирующего эффекта. Предполагается, что набегающий поток формируется идеальной несжимаемой средой (газом или жидкостью) заданной плотности. Экранирующий эффект создается за счет горизонтальной плоскости, располо-

женной внизу, на некотором удалении от обтекаемого тела. Таким образом, предлагается рассматривать классическую задачу обтекания кругового цилиндра потоком идеальной несжимаемой среды при существенных уточнениях — обтекание происходит при наличии экранирующей плоскости и при этом допускается наличие завихренности набегающего потока.

Основной целью является вычисление подъемной силы (lift force) и лобового сопротивления (drag) и исследование влияния на эти характеристики экранирующего эффекта. Также поставим задачей выявить количественные зависимости основных характеристик от расстояния до экранирующей плоскости и получить аналоги известных формул типа Чаплыгина – Жуковского для данного случая.

2. Математическая постановка задачи. Задачу предлагается рассматривать в декартовой системе координат, центр которой совмещен с центром окружности, получающейся в результате сечения цилиндра перпендикулярной плоскостью. Ось OX направим перпендикулярно оси цилиндра и параллельно экранирующей плоскости, ось OY — перпендикулярно экранирующей плоскости, вверх. Все дальнейшие выкладки будем вести в безразмерных переменных, при следующем выборе масштабов. Пусть L и U_0 соответственно — масштабы длины и скорости, ρU_0^2 — масштаб давления. Окружность, задающая контур обтекаемого тела, определяется уравнением $x^2 + y^2 = r^2$, где $r = \frac{R}{L}$ — безразмерный радиус цилиндра. Величины ρ , U_0 и r считаем заданными положительными параметрами. Экранирующую плоскость полагаем расположенной параллельно главной оси цилиндра на глубине $h = \frac{H}{L}$. Такая плоскость задается уравнением $y = -h$, где h — некоторый положительный параметр, удовлетворяющий ограничению $h > r$.

К рассмотрению предлагается плоская задача, когда движение одинаково во всех плоскостях перпендикулярных оси цилиндра. В отличие от работы [9], в предлагаемой постановке допускается наличие завихренности набегающего потока. В качестве основных неизвестных, как это и принято при рассмотрении плоской задачи обтекания, полагаем u , v , p , где u и v — скорости потока, соответственно продольная и поперечная, p — давление. В качестве вспомогательной величины рассмотрим функцию тока $\Psi_1(x, y)$ [10] – [13].

Решение задачи будем строить в виде разложений по степеням $x^n \cdot y^m$, где n и m — целые неотрицательные числа, такие что $n + m \leq N$, а N — номер приближения. Предварительные вычисления показывают, что для получения нетривиальных зависимостей достаточно рассмотреть пятое приближение $N=5$, когда функция тока задается выражением

$$\Psi_1(x, y) = \sum_{n=0}^5 \sum_{m=0}^{5-n} a_{nm} x^n y^m. \quad (1)$$

Величины a_{nm} в формуле (1) — некоторые коэффициенты, не зависящие от x и y . В правой части (1) число таких коэффициентов равно 21. Скорости u , v определяются через функцию тока согласно выражениям

$$u = \frac{\partial \Psi_1}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \Psi_1}{\partial x}. \quad (2)$$

Ясно, что при $N=5$ скорости u и v будут задаваться в виде многочленов четвертой степени относительно $x^n \cdot y^m$. Старшим коэффициентом разложения для продольной скорости u является a_{01} . Положим, для простоты, $a_{01} = 1$. Это соответствует тому, что размерное значение этой величины равно U_0 , где U_0 определяет масштаб скорости.

Задачу будем рассматривать при следующих граничных условиях. Условие первое — условие непротекания вдоль контура обтекаемого тела [12] – [13]. Это условие требует, чтобы вдоль контура обтекаемого тела вектор скорости был направлен по касательной. Для нашего случая данное условие можно задать равенством

$$(ux + vy)|_{x^2+y^2=r^2} = 0. \quad (3)$$

Второе граничное условие — условие непротекания на экранирующей поверхности. Это условие соответствует тому, что на экранирующей поверхности вектор скорости направлен вдоль нее. Для нашего случая это условие сводится к соотношению

$$v(x, -h) = 0. \quad (4)$$

Потребуем также выполнимости дополнительного, третьего граничного условия. Оно получается из рассмотрения выражения $u(x, y)$ при $x = -1$, т. е. $u(-1, y)$. Это выражение задает профиль продольной скорости в сечении $x = -1$. В рамках рассматриваемого приближения его можно представить в виде

$$u(-1, y) = 1 + \delta_1 y + \delta_2 y^2 + \delta_3 y^3 + \delta_4 y^4,$$

где δ_i — некоторые коэффициенты разложения.

Чтобы избежать парадокса Даламбера [12] – [13], потребуем отсутствия симметрии профиля по y . Для этого достаточно потребовать, чтобы нечетные коэффициенты разложения были отличны от нуля:

$$\delta_1 \neq 0, \quad \delta_3 \neq 0. \quad (5)$$

Так что в качестве третьего граничного условия потребуем выполнимости ограничений (5).

В качестве определяющих уравнений рассмотрим 2D уравнения Эйлера для установившегося движения идеальной несжимаемой среды [12] – [13]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial(p + \Phi)}{\partial x}; \quad u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial(p + \Phi)}{\partial y}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

где Φ — обозначает потенциал внешних сил. Для нашего случая $\Phi = gy$, где g — ускорение свободного падения.

Решение и все последующие вычисления значительно упростятся, если использовать не уравнения (6) непосредственно, а первый интеграл этих уравнений. Вывод и описание первого интеграла уравнений Навье – Стокса для движения вязкой несжимаемой среды и уравнений Эйлера, как частного случая, приведены в работах [14] – [18]. Для случая 2D движения первый интеграл уравнений Эйлера сводится к трем соотношениям:

$$p + gy + \frac{U^2}{2} + d = 0, \quad (8)$$

$$u^2 - v^2 = -\frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y^2}, \quad uv = -\frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x \partial y}, \quad (9)$$

где Ψ_2 — обозначает новое ассоциированное неизвестное, U и d — соответственно модуль скорости и диссипативный член, вычисляемые по формулам:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad d = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y^2} \right). \quad (10)$$

Таким образом, в качестве основной задачи, определяющей математическую постановку, имеем граничную задачу для уравнений (7), (9) при граничных условиях (3 – 5). Решение этой задачи позволит определить скорости u , v и неизвестное Ψ_2 . Давление определяется затем по соотношению (8) с учетом (10).

3. Решение. В рамках пятого приближения скорости u и v задаются в виде многочленов четвертой степени относительно $x^n \cdot y^m$. Выражения для скоростей получаются из (2) с учетом (1), и они заведомо удовлетворяют уравнению неразрывности (7). Подберем коэффициенты a_{nm} так, чтобы изначально удовлетворить граничным условиям (3 – 5). Первым удовлетворим условию (3). Выражения для u и v подставим в левую часть (3) и, приведя подобные члены, приравняем нулю коэффициенты при одинаковых степенях $x^n \cdot y^m$. Получим равенства, которые дают новые ограничения на коэффициенты:

$$a_{05} = -\frac{1}{r^2}(a_{03} + \frac{a_{01}}{r^2}), \quad a_{50} = -\frac{1}{r^2}(a_{30} + \frac{a_{10}}{r^2}), \quad a_{41} = -\frac{1}{r^2}(a_{21} + \frac{a_{01}}{r^2}), \quad a_{14} = -\frac{1}{r^2}(a_{12} + \frac{a_{10}}{r^2});$$

$$a_{32} = -\frac{1}{r^2}(a_{12} + a_{30} + 2\frac{a_{10}}{r^2}), \quad a_{23} = -\frac{1}{r^2}(a_{21} + a_{03} + 2\frac{a_{01}}{r^2}), \quad a_{31} = a_{13} = -\frac{a_{11}}{r^2};$$

$$a_{04} = \frac{a_{22}}{2} - \frac{1}{2r^2}(a_{02} - a_{20}), \quad a_{40} = \frac{a_{22}}{2} + \frac{1}{2r^2}(a_{02} - a_{20}).$$

С учетом этих ограничений выражения для скоростей принимают вид

$$u = 1 + a_{11}x + 2a_{02}y + a_{21}x^2 + 2a_{12}xy + 3a_{03}y^2 - \frac{a_{11}}{r^2}x^3 + 2a_{22}x^2y - \frac{3a_{11}}{r^2}xy^2 + 2\left(a_{22} + \frac{a_{20} - a_{02}}{r^2}\right)y^3 - \left(\frac{a_{21}}{r^2} + \frac{1}{r^4}\right)x^4 - \frac{2}{r^2}\left(a_{12} + a_{30} + \frac{2a_{10}}{r^2}\right)x^3y - \frac{3}{r^2}\left(a_{21} + a_{03} + \frac{2}{r^2}\right)x^2y^2 - \frac{4}{r^2}\left(a_{12} + \frac{a_{10}}{r^2}\right)xy^3 - \frac{5}{r^2}\left(a_{03} + \frac{1}{r^2}\right)y^4; \quad (11)$$

$$v = -(a_{10} + 2a_{20}x + a_{11}y + 3a_{30}x^2 + 2a_{21}xy + a_{12}y^2 + 2\left(a_{22} + \frac{a_{02} - a_{20}}{r^2}\right)x^3 - 3\frac{a_{11}}{r^2}x^2y + 2a_{22}xy^2 - \frac{a_{11}}{r^2}y^3 - \frac{5}{r^2}\left(a_{30} + \frac{a_{10}}{r^2}\right)x^4 - \frac{4}{r^2}\left(a_{21} + \frac{1}{r^2}\right)x^3y - \frac{3}{r^2}\left(a_{12} + a_{30} + \frac{2}{r^2}\right)x^2y^2 - \frac{2}{r^2}\left(a_{21} + a_{03} + \frac{2}{r^2}\right)xy^3 - \frac{1}{r^2}\left(a_{12} + \frac{a_{10}}{r^2}\right)y^4). \quad (12)$$

Выражения (11) – (12) удовлетворяют и уравнению неразрывности (7), и условию (3), которое соответствует условию непротекания на поверхности обтекаемого тела. Выражения (11) – (12) содержат девять пока не определенных коэффициентов a_{nm} .

Далее рассмотрим условие (4). Левая часть (4) есть многочлен четвертой степени относительно x . Для выполнимости равенства (4) достаточно приравнять нулю все коэффициенты при x^n , где $n = 0, 1, \dots, 4$. Это приводит к пяти дополнительным ограничениям:

$$a_{30} + \frac{a_{10}}{r^2} = 0, \quad \frac{1}{2}\left(a_{22} + \frac{a_{02} - a_{20}}{r^2}\right) + \frac{h}{r^2}\left(a_{21} + \frac{1}{r^2}\right) = 0, \quad a_{30} + \frac{ha_{11}}{r^2} - \frac{h^2}{r^2}\left(a_{12} + a_{30} + \frac{2a_{10}}{r^2}\right) = 0;$$

$$a_{20} - ha_{21} + h^2a_{22} + \frac{h^3}{r^2}\left(a_{21} + a_{03} + \frac{2}{r^2}\right) = 0, \quad a_{10} - ha_{11} + h^2a_{12} + \frac{h^3a_{11}}{r^2} - \frac{h^4}{r^2}\left(a_{12} + \frac{a_{10}}{r^2}\right) = 0. \quad (13)$$

Чтобы удовлетворить условию (5), нужно воспользоваться выражением (11) при $x = -1$ и рассмотреть первые два нечетных члена разложения по координате y . В результате получаем еще два дополнительных равенства:

$$a_{02} - a_{12} + a_{22} + \frac{1}{r^2}\left(a_{12} + a_{30} + \frac{2a_{10}}{r^2}\right) = \delta_1; \quad \frac{1}{2}\left(a_{22} - \frac{a_{02} - a_{20}}{r^2}\right) + \frac{1}{r^2}\left(a_{12} + \frac{a_{10}}{r^2}\right) = \delta_3, \quad (14)$$

где δ_1, δ_3 — некоторые отличные от нуля параметры.

Таким образом, для того чтобы удовлетворить всем граничным условиям, достаточно разрешить систему семи линейных уравнений (13) – (14) относительно девяти оставшихся коэффициентов a_{nm} и получающиеся соотношения использовать в (11) – (12). Предварительный анализ показывает, что мы имеем превышение числа неизвестных над числом уравнений. Три из девяти неизвестных останутся неопределенными. В качестве таких базовых коэффициентов предлагается выбрать a_{10}, a_{11}, a_{02} . Остальные коэффициенты однозначно определяются через них. Решение системы (13) – (14) приводит к следующим результатам:

$$a_{30} = -\frac{a_{10}}{r^2}, \quad a_{21} = \frac{a_{02}r^2}{h} - \frac{a_{11}r^2}{h^2} + \left(1 + \frac{r^2}{h^2}\right) \cdot \frac{a_{10}}{h} + \left(\frac{\delta_3}{2} - \delta_1\right) \cdot \frac{r^2}{2h} - \frac{1}{r^2}, \quad a_{12} = \frac{a_{11}}{h} - \left(1 + \frac{h^2}{r^2}\right) \cdot \frac{a_{10}}{h^2};$$

$$a_{22} = -a_{02} + \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) \frac{a_{11}}{h} + \frac{1 - r^2 - h^2}{r^2h^2} a_{10} + \frac{\delta_1}{2}, \quad a_{20} = (1 + r^2) \cdot \left(a_{02} - \frac{a_{11}}{h}\right) + \frac{1 + r^2 + h^2}{h^2} \cdot a_{10} + (\delta_3 - \delta_1) \frac{r^2}{2};$$

$$a_{03} = -\frac{a_{02}r^2}{h^3} + \left(1 + \frac{r^2}{h^2}\right) \cdot \frac{a_{11}}{h^2} - \frac{r^2 + h^2}{h^5} a_{10} - \left(1 + \frac{r^2}{h^2}\right) \cdot \frac{r^2\delta_3}{4h} - \frac{r^2 + h^2}{r^2h^2}. \quad (15)$$

Таким образом, выражения (11) – (12), с учетом (15), изначально удовлетворяют и уравнению неразрывности (7), и граничным условиям (3) – (5). Эти выражения содержат в качестве параметров величины r, h, δ_1, δ_3 , и в них фигурируют три пока не определенных коэффициента a_{10}, a_{11}, a_{02} . Для их определения обратимся к уравнениям (9). В этих уравнениях, наряду с u, v , фигурирует также и ассоциированное неизвестное Ψ_2 . Это неизвестное также зададим в виде степенного разложения

$$\Psi_2(x, y) = \sum_{n=0}^5 \sum_{m=0}^{5-n} b_{nm} x^n y^m, \quad (16)$$

где b_{nm} представляют некоторые, пока не определенные коэффициенты.

Подставляя (16) в (9) и приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях $x^n y^m$ в левых и правых частях, получаем систему линейных неоднородных уравнений относительно b_{nm} . Анализ этой системы приводит к следующему выводу. Система допускает решение только в том случае, если выполнены условия совместности. В рамках рассматриваемого приближения условия совместности сводятся к трем уравнениям относительно базовых коэффициентов a_{10}, a_{11}, a_{02} . Эти уравнения следующие:

$$-\frac{a_{11}a_{10}}{h} + a_{10}^2 \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{3} \right) + \frac{a_{11}}{3} + \frac{2a_{10}}{3h} = 0; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & a_{02}^2 \frac{2r^2}{h} \left(\frac{3}{h^2} - 1 \right) (1+r^2) + a_{11}^2 \frac{1}{h} \left(1 + \frac{5}{h^2} + r^2 \left(\frac{4}{h^2} + \frac{6}{h^4} \right) + r^4 \left(-\frac{2}{h^2} + \frac{6}{h^4} \right) \right) + a_{10}^2 \left((1+h^2) \left(-\frac{2}{h^3} + \frac{6}{h^5} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{r^2}{h^3} \left(-4 + \frac{10}{h^2} + \frac{6}{h^4} \right) + \frac{r^4}{h^5} \left(-2 + \frac{6}{h^2} \right) \right) + a_{11}a_{10} \left(\frac{2}{r^2} - \frac{5}{h^2} - \frac{12}{h^4} + \frac{2r^2}{h^2} \left(2 - \frac{7}{h^2} - \frac{3}{h^4} \right) + \frac{4r^4}{h^4} \left(1 - \frac{3}{h^2} \right) \right) + \\ & + a_{02}a_{11} \frac{2}{h^2} \left(-3 - r^2 \left(1 + \frac{6}{h^2} \right) + r^4 \left(2 - \frac{6}{h^2} \right) \right) + a_{02}a_{10} \frac{2}{h^2} \left(-1 + \frac{3}{h^2} + r^2 \left(-2 + \frac{4}{h^2} + \frac{6}{h^4} \right) + r^4 \left(-\frac{2}{h^2} + \frac{6}{h^4} \right) \right) + \\ & + (3\delta_1 + \delta_3 + r^2 \frac{3(\delta_3 - \delta_1)}{h^2} + r^4 \frac{(\delta_3 - \delta_1)}{h} \left(\delta_3 - \frac{\delta_1}{2} \right) + r^6 \frac{3\delta_3}{4h^3} (\delta_3 - \delta_1)) + a_{02} \left(\frac{8}{r^2} - 12 + \frac{6}{h^2} + \right. \\ & \left. + r^2 \left(\frac{15}{2h} + \frac{\delta_1}{h} - \frac{\delta_3}{2h} \right) + \frac{r^4}{h} \left(2\delta_1 - 1,5\delta_3 + \frac{3\delta_3}{h^2} - \frac{3\delta_1}{h^2} + \frac{3}{2} + \frac{3}{2h^2} \right) + \frac{3r^6}{2h^2} \right) + a_{11} \left(-\frac{10}{hr^2} + \frac{6}{h} - \frac{6}{h^3} + r^2 \left(-\frac{3\delta_3}{2h^4} - \frac{5\delta_3}{2h^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{5\delta_1}{2h^2} - \frac{3\delta_3}{2h^4} \right) + \frac{r^4}{h^2} \left(-2\delta_1 - \frac{5\delta_3}{h^2} + \frac{3\delta_1}{h^2} \right) \right) + a_{10} \left(\frac{14 - 2h^2}{r^2 h^2} + \frac{4}{h^2} + \frac{6}{h^4} + r^2 \left(\frac{\delta_1 - 1,5\delta_3}{h} + \frac{5\delta_3 - 7\delta_1}{2h^3} + \frac{6}{h^4} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{r^4}{h^3} \left(2\delta_1 - 1,5\delta_3 + \frac{3\delta_3}{h^2} - \frac{3\delta_1}{h^2} \right) \right) = 0; \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & a_{10}^2 \frac{(-14 + 2r^2 + 2h^2)}{r^2 h^2} + \frac{a_{11}^2}{h^2} \left(-3 \left(1 + \frac{r^2}{h^2} \right) + r^2 \right) + \frac{a_{02}a_{11}}{h} \left(2 - r^2 + \frac{3r^2}{h^2} \right) + 2a_{02}a_{10} \left(-\frac{4}{r^2} + 1 - \frac{1}{h^2} \right) + \\ & + \frac{a_{11}a_{10}}{h} \left(\frac{14}{r^2} - 3 + \frac{3}{h^2} + \frac{r^2}{h^2} \left(\frac{3}{h^2} - 1 \right) \right) + a_{11} \left(-\frac{2}{r^2} + \frac{3}{h^2} + \frac{r^2}{2h} (\delta_3 + \delta_1) + \frac{3r^4}{4h^3} \right) - a_{10} (\delta_1 + 3\delta_3) = 0. \quad (19) \end{aligned}$$

Уравнения (17) – (19) нелинейные, что является следствием нелинейности исходных уравнений (9). Решение в общем виде уравнений (17) – (19) представляется достаточно сложным. На данном этапе предлагается применить асимптотический подход и тем самым значительно упростить вычисления. Асимптотические методы широко используются в задачах гидроаэромеханики. Достаточно вспомнить известную формулу Н. Е. Жуковского для подъемной силы в случае безвихревого обтекания профиля потоком идеального газа [13]. Применительно к задачам обтекания с учетом экранирования асимптотический подход использовался в работе [19].

Для нашего случая предлагается использовать разложения по малому параметру r^2 , где $r^2 \rightarrow 1$ (или $\frac{R^2}{L^2} \rightarrow 1$). В результате будут получены формулы, справедливые для случая малых размеров обтекаемого тела по сравнению с размерами набегающего потока. Разложения a_{nm} по степеням r^2 зададим в виде

$$a_{nm} = a_{nm}^{(0)} + a_{nm}^{(1)}r^2 + a_{nm}^{(2)}r^4 + \dots + a_{nm}^{(k)}r^{2k} + \dots, \quad (20)$$

где $a_{nm}^{(k)}$ — коэффициенты разложения. Эти величины зависят от параметров h, δ_1, δ_3 , но не зависят от r^2 . Для получения приближенных формул достаточно найти главные члены асимптотических разложений, а именно — члены, соответствующие $k=0$ и $k=1$. Подставим (20) в уравнения (170 – (19), определяющие a_{11}, a_{02}, a_{10} и приравняем коэффициенты при одинаковых степенях $(r^2)^j$ в обеих частях. Для значений $j = -1$ и $j = 0$ получаем следующие соотношения:

$$a_{11}^{(0)}a_{10}^{(0)} = -4a_{02}^{(0)} + \frac{5}{h} \cdot a_{11}^{(0)} + a_{10}^{(0)} \frac{(3h^2 - 5)}{h^2}; \quad (21)$$

$$a_{10}^{(0)2} = \frac{3h^2}{3-h^2} \left(a_{11}^{(0)} \frac{15-h^2}{3h^2} - a_{02}^{(0)} \frac{4}{h} + a_{10}^{(0)} \frac{7h^2-15}{3h^3} \right); \quad (22)$$

$$a_{02}^{(0)}a_{10}^{(0)} = -a_{11}^{(0)} \frac{4}{(3-h^2)} + a_{02}^{(0)} \frac{4}{(3-h^2)} + a_{10}^{(0)} \frac{(58-21h^2)}{8h(3-h^2)}. \quad (23)$$

Система (21) – (23) представляет квазилинейную систему относительно $a_{11}^{(0)}, a_{02}^{(0)}, a_{10}^{(0)}$ с квадратичными нелинейностями в левых частях. Уравнения (21) – (23) существенно проще уравнений (17) – (19). Для разрешения уравнений (21) – (23) предлагается подход, основанный на следующих рассуждениях. Все члены в левых частях пропорциональны $a_{10}^{(0)}$. Обозначим эту величину, как χ . Тогда (21) – (23) можно рассматривать как систему трех линейных однородных уравнений относительно $a_{11}^{(0)}, a_{02}^{(0)}, a_{10}^{(0)}$ с главным определителем Δ , зависящим от h и χ . Известно, что система однородных линейных уравнений имеет нетривиальные решения, только если $\Delta = 0$. Причем, таких решений будет бесконечное множество. Для нашего случая имеем равенство нулю определителя третьего порядка:

$$\begin{vmatrix} -\chi h^2 + 5h & -4h^2 & 3h^2 - 5 \\ -32h & -\chi 8h(3-h^2) + 32h & 58 - 21h^2 \\ h(15-h^2) & 12h^2 & -\chi h(3-h^2) + 7h^2 - 15 \end{vmatrix} = 0. \quad (24)$$

Равенство (24) приводит к кубическому уравнению относительно χ . Каждый корень этого уравнения дает возможное значение неизвестного $a_{10}^{(0)}$. Неизвестные $a_{11}^{(0)}, a_{02}^{(0)}$ определяются через него посредством простых линейных операций. Таким образом, будут найдены $a_{11}^{(0)}, a_{02}^{(0)}, a_{10}^{(0)}$ и, значит, построены нулевые члены асимптотики (20) при $r^2 \rightarrow 0$. Для того чтобы построить следующие члены асимптотики, нужно найти величины $a_{11}^{(1)}, a_{02}^{(1)}, a_{10}^{(1)}$. Вычисления приводят к следующей системе для их определения:

$$\begin{aligned} & a_{11}^{(1)} \left(\frac{1}{3} - \frac{a_{10}^{(0)}}{h} \right) + a_{10}^{(1)} \left(\frac{2}{3h} - \frac{a_{11}^{(0)}}{h} + 2a_{10}^{(0)} \left(\frac{3-h^2}{3h^2} \right) \right) = 0; \\ & a_{11}^{(1)} \left(\frac{7a_{10}^{(0)}}{h} - 1 \right) - 4a_{02}^{(1)}a_{10}^{(0)} + a_{10}^{(1)} \left(\frac{2a_{10}^{(0)}(h^2-7)}{h^2} + a_{11}^{(0)} \frac{7}{h} - 4a_{02}^{(0)} \right) = -\frac{a_{10}^{(0)2}}{h^2} + \frac{3}{2h^2} a_{11}^{(0)2} - \frac{a_{02}^{(0)}a_{11}^{(0)}}{h} + \frac{3}{2h^3} (h^2-1)a_{11}^{(0)}a_{10}^{(0)} + \\ & \quad \frac{1-h^2}{h^2} a_{02}^{(0)}a_{10}^{(0)} - \frac{3}{2h^2} a_{11}^{(0)} + a_{10}^{(0)} (\delta_1 + 3\delta_3); \\ & a_{11}^{(1)} \left(a_{10}^{(0)} - \frac{5}{h} \right) + 4a_{02}^{(1)} + a_{10}^{(1)} \left(a_{11}^{(0)} - 3 + \frac{5}{h^2} \right) = -a_{11}^{(0)2} \frac{h^2+6}{3h^3} + a_{10}^{(0)2} \frac{h^4-2h^2-3}{h^5} + a_{11}^{(0)}a_{10}^{(0)} \frac{5h^2+6}{2h^4} + \frac{3}{h^2} a_{02}^{(0)}a_{11}^{(0)} + \\ & \quad a_{02}^{(0)}a_{10}^{(0)} \frac{h^2-3}{h^3} + a_{02}^{(0)} 3 \frac{(2h^2-1)}{h^2} + a_{11}^{(0)} 3 \frac{(1-h^2)}{h^3} - a_{10}^{(0)} \frac{3}{h^4} - \frac{3\delta_1 + \delta_3}{2}. \end{aligned} \quad (25)$$

Следуя описанной процедуре, последовательно разрешим систему (21) – (23) относительно $a_{10}^{(0)}$, $a_{11}^{(0)}$, $a_{02}^{(0)}$, а затем и систему (25) относительно $a_{11}^{(1)}$, $a_{02}^{(1)}$, $a_{10}^{(1)}$. В результате будут определены, с точностью до членов первого порядка, величины a_{nm} , а затем и b_{nm} . Тогда по формулам (11) – (12) и (8) определятся и основные неизвестные u , v и p . Это позволит, в свою очередь, вычислить и все другие интересующие нас величины.

4. Подъемная сила и лобовое сопротивление. Исходные общие формулы для вычисления этих важнейших характеристик при обтекании тела потоком несжимаемой среды приведены в [12] – [13]. Для нашего случая их можно представить в виде:

$$F_y = - \int_0^{2\pi} p(r \cos \varphi; r \sin \varphi) \cdot r \sin \varphi d\varphi; \quad F_x = - \int_0^{2\pi} p(r \cos \varphi; r \sin \varphi) \cdot r \cos \varphi d\varphi. \quad (26)$$

В формулах (26) интегрирование производится по углу φ , вдоль контура окружности радиуса r в пределах от нуля до 2π . Подынтегральное выражение определяется функцией $p(x, y)$, где $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$. Функция $p(x, y)$ находится согласно уравнению (8), с учетом (10), (16).

Последовательные преобразования по формулам (26) с учетом (8) приводят к следующим результатам. В рамках рассматриваемого приближения подъемная сила F_y и сила лобового сопротивления F_x , отнесенные к величине $\rho \pi r^2 L^2 U_0^2$, определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \frac{F_y}{\rho \pi r^2 L^2 U_0^2} = & g + \frac{1}{2} a_{11}^{(0)} a_{10}^{(0)} + \frac{1}{4} a_{02}^{(0)} + a_{11}^{(0)} \left(\frac{7}{4h} - \frac{3}{4} \right) + a_{10}^{(0)} \left(1 - \frac{1}{h^2} \right) + \\ & + r^2 \left\{ \frac{a_{11}^{(0)2}}{2h} \left(\frac{7}{4} + \frac{3}{h^2} \right) - \frac{a_{11}^{(0)} a_{10}^{(0)}}{2h^2} \left(\frac{21}{4} + \frac{3}{h^2} \right) + \frac{3a_{02}^{(0)} a_{10}^{(0)}}{2h} \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{2} \right) + \frac{a_{10}^{(0)2}}{2h} \left(\frac{1}{2} + \frac{7}{2h^2} + \frac{3}{h^4} \right) - \frac{3a_{11}^{(0)} a_{02}^{(0)}}{2h^2} + \right. \\ & + a_{02}^{(0)} \left(1 - \frac{3}{2h^2} \right) - \frac{a_{11}^{(0)}}{2h} \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{h^2} \right) + a_{10}^{(0)} \left(\frac{3}{2h^4} + \frac{9}{2h^2} - \frac{2}{h} \right) + \left(\frac{7}{8} \delta_3 - \frac{11}{8} \delta_1 \right) + \frac{1}{2} a_{11}^{(0)} a_{10}^{(1)} + \frac{1}{2} a_{10}^{(0)} a_{11}^{(1)} - \\ & \left. \frac{17}{12} a_{02}^{(1)} - a_{11}^{(1)} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4h} \right) + a_{10}^{(1)} \left(1 - \frac{1}{h^2} \right) \right\}; \quad (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{F_x}{\rho \pi r^2 L^2 U_0^2} = & a_{02}^{(0)} a_{10}^{(0)} + a_{10}^{(0)2} \left(\frac{3}{2} - \frac{7}{4h^2} \right) + \frac{5}{4} a_{11}^{(0)} + r^2 \left\{ - \frac{3}{4h} a_{11}^{(0)} a_{02}^{(0)} + \frac{5}{8h^2} a_{11}^{(0)2} - \right. \\ & \frac{a_{11}^{(0)} a_{10}^{(0)}}{8h} \left(17 + \frac{13}{h^2} \right) + \frac{a_{02}^{(0)} a_{10}^{(0)}}{4} \left(5 + \frac{3}{h^2} \right) + a_{10}^{(0)2} \left(\frac{5}{4h^2} + \frac{1}{h^4} \right) + \frac{3}{8h^2} a_{11}^{(0)} + a_{10}^{(0)} \left(\frac{1}{8} \delta_3 - \frac{5}{8} \delta_1 \right) + \\ & \left. + a_{02}^{(0)} a_{10}^{(1)} + a_{10}^{(0)} a_{02}^{(1)} + a_{10}^{(0)} a_{10}^{(1)} \left(3 - \frac{7}{2h^2} \right) + \frac{5}{4} a_{11}^{(1)} \right\}. \quad (28) \end{aligned}$$

Произведем краткое описание и анализ этих формул. Полученные формулы (27) – (28) являются новыми, они позволяют вычислять F_y и F_x как функции определяющих параметров. Данные формулы, как и известные формулы Жуковского, имеют асимптотический характер. Формулы (27) – (28) справедливы при малых значениях квадрата радиуса обтекаемого тела r^2 . Правые части формул представлены суммами двух групп слагаемых. Первые группы есть результат нулевого приближения по r^2 . Слагаемые первых групп зависят от значений базовых коэффициентов в нулевом приближении, т. е. зависят от $a_{10}^{(0)}$, $a_{11}^{(0)}$, $a_{02}^{(0)}$. Эти слагаемые дают основной вклад в величины F_y и F_x . Слагаемые вторых есть результат первого приближения по r^2 , они пропорциональны r^2 . Эти слагаемые зависят также и от значений базовых коэффициентов в первом приближении, т. е. от величин $a_{10}^{(1)}$, $a_{11}^{(1)}$, $a_{02}^{(1)}$.

В правых частях присутствуют в качестве параметров также величины h , δ_1 , δ_3 . Величина h представляет расстояние от обтекаемого тела до экранирующей плоскости и во многом определяет степень влияния экранирующего эффекта на F_x и F_y . Поскольку h присутствует лишь в знаменателях правых частей, то очевидно, что при уменьшении величины h влияние эффекта экранирования будет возрастать.

Параметры δ_1, δ_3 определяют зависимость степени несимметричности набегающего потока на F_x и F_y . Чем более несимметричен набегающий поток, тем больше по модулю величины δ_1, δ_3 . Поскольку в правых частях формул (27) – (28) величины δ_1 и δ_3 присутствуют с разными знаками, то их влияние на F_x и F_y неоднозначно.

Кроме перечисленных величин в правой части формулы (26) для F_y присутствует и g . Эта величина есть безразмерное ускорение свободного падения. Она представляет относительный вклад от архимедовой силы в выражении для F_y . При обтекании воздушной средой со скоростями порядка 500 (км/ч) вклад от этой величины по сравнению с другими слагаемыми мал.

5. Результаты расчетов. При некоторых значениях определяющих параметров по формулам (26) – (28) были произведены расчеты F_x и F_y . Расчеты были выполнены для случая $r = 0,2$, что соответствует предположению о малости размера цилиндра по сравнению с размерами набегающего потока. Безразмерное расстояние до экранирующей плоскости принималось как $h = 2,0$; $h = 1,0$ и $h = 0,5$. Эти значения соответствуют расстоянию до экранирующей плоскости равному $10R$; $5R$ и $2,5R$ соответственно. Рассматривая F_x и F_y при значениях h в указанном порядке, т. е. при убывании h , представляется возможным проследить влияние экранирующего эффекта на F_x и F_y . Чем меньше h , тем ожидаемо больше это влияние. Значения параметров δ_1 и δ_3 при расчетах были выбраны как $\delta_1 = \delta_3 = 4$. Это соответствует средней степени несимметричности набегающего потока.

Предварительно в качестве вспомогательных величин были вычислены значения базовых коэффициентов a_{11}, a_{02}, a_{10} . Значения нулевого и первого членов асимптотических разложений $a_{nm}^{(0)}$ и $a_{nm}^{(1)}$, которые присутствуют в правых частях формул (27) – (28), были найдены с помощью стандартных программ пакета Maple. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения базовых коэффициентов

$h \setminus a_{nm}$	$a_{11}^{(0)} \setminus a_{11}^{(1)} r^2$	$a_{02}^{(0)} \setminus a_{02}^{(1)} r^2$	$a_{10}^{(0)} \setminus a_{10}^{(1)} r^2$
2,0	4,158 \ -0,014	2,138 \ -0,042	0,766 \ 0,022
1,0	2,000 \ 0,100	1,500 \ 0,065	1,000 \ 0,020
0,5	2,588 \ 3,007	4,873 \ -10,929	0,326 \ -0,620

Каждая строка таблицы соответствует определенному значению h . Численные значения коэффициентов представлены в столбцах таблицы. Для удобства анализа и расчета по формулам (27) – (28) значения коэффициентов представлены в виде дроби, в числителе которой дано $a_{nm}^{(0)}$, а в знаменателе — $a_{nm}^{(1)} \cdot r^2$.

Результирующие значения лобового сопротивления и подъемной силы, вычисленные согласно (27) – (28) при указанных значениях определяющих параметров, представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Лобовое сопротивление и подъемная сила
как функции расстояния до экранирующей плоскости**

$h \setminus F_i$	F_x	F_y
2,0	7,263	3,477
1,0	3,830	3,219
0,5	3,455	19,574

Каждая строка таблицы соответствует определенному значению h в убывающем порядке от $h = 2,0$ до $h = 0,5$. Значения F_x и F_y представлены в столбцах таблицы. Эти значения есть результат вычисления F_y и F_x по асимптотическим формулам с точностью до членов порядка r^2 , т. е. с учетом и нулевого, и первого приближений. При изменении величины h от 2,0 до 0,5 можно просле-

дить следующие закономерности. Величина F_y возрастает от значения 3,477 при $h=2,0$ до 19,574 при $h=0,5$. Т. е. при уменьшении расстояния до экранирующей поверхности в четыре раза имеем увеличение подъемной силы в 5,63 раза. Таким образом, имеем увеличение подъемной силы в результате экранирующего эффекта при приближении к экранирующей поверхности.

Еще одно проявление экранирующего эффекта можно проследить, если рассмотреть изменение величины F_x в зависимости от h . Величина F_x убывает от значения 7,263 при $h=2$ до 3,455 при $h=0,5$. Таким образом, при уменьшении расстояния до экранирующей плоскости в четыре раза лобовое сопротивление уменьшается в 2,10 раза.

Выводы. Предлагаемая модель и методика расчета позволяют на практике определять подъемную силу и лобовое сопротивление при обтекании цилиндра потоком идеальной несжимаемой среды при наличии экранирования. Получены формулы, позволяющие определять эти величины, как функции определяющих параметров.

Представляется возможным также определить поле скоростей и давление вблизи обтекаемого тела и оценить влияние экранирующего эффекта на эти характеристики.

Теоретическое обоснование получила высказанная ранее гипотеза о возрастании подъемной силы при приближении обтекаемого тела к экранирующей поверхности. Также получило теоретическое обоснование убывание лобового сопротивления при приближении обтекаемого тела к экранирующей поверхности.

В основном режиме движения экраноплана и то, и другое являются благоприятствующими факторами. Таким образом, теоретически доказано, что выгода от эффекта экранирования получается двойная. С одной стороны, увеличивается подъемная сила, а с другой — уменьшается лобовое сопротивление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белавин Н. И.* Экранопланы / Н. И. Белавин. — Л.: Судостроение, 1977. — 232 с.
2. *Маскалик А. И.* Крылатые суда России: история и современность / А. И. Маскалик, Р. А. Нагапетян, А. Я. Вольфензон. — СПб.: Судостроение, 2006. — 240 с.
3. *Маскалик А. И.* Экранопланы. Особенности теории и проектирования / А. И. Маскалик [и др.]. — СПб.: Судостроение, 2000. — 320 с.
4. *Петров Г. Ф.* Гидросамолеты и экранопланы России: 1910 – 1999 / Г. Ф. Петров. — М.: Русавиа, 2000. — 248 с.
5. *Небылов А. В.* Российские экранопланы: новые перспективы в международном сотрудничестве / А. В. Небылов, В. А. Небылов // Русский инженер. — 2013. — № 4 (39). — С. 33–36.
6. *Болотин А. А.* Математическое моделирование движения экраноплана при разгоне / А. А. Болотин // Труды НГТУ. — 2013. — № 5 (102). — С. 283–286.
7. *Nebylov A. V.* Wing-in-ground Effect Vehicles: Modern Concepts of Design and New Role of Automatic Control / A. V. Nebylov, V. A. Nebylov // 3-rd European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS), EUCASS Association. — 2009. — Pp. 1–10.
8. *Lange R. H.* Large Wing-in-Ground Effect Transport Aircraft / R. H. Lange, J. W. Moor // Journal of aircraft. — 1980. — Vol. 17. — № 4. — Pp. 260–266.
9. *Фролова К. В.* Несжимаемое потенциальное течение около цилиндра при наличии циркуляции и экранирующей поверхности / К. В. Фролова, В. А. Фролов // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Ч. 6. Аэромеханика и летательная техника: материалы 52-й науч. конф. МФТИ. — М.: Жуковский, 2009. — С. 31–33.
10. *Milne-Thomson L. M.* Theoretical Hydrodynamics / M. M. Thomson. — London: Macmillan and Co. LTD. — New York: St. Martin's Press, 1960.
11. *Кочин Н. Е.* Теоретическая гидромеханика: в 2 ч. / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. — М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. — Ч. 2. — 727 с.
12. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1987. — 833 с.
13. *Валландер С. В.* Лекции по гидроаэромеханике / С. В. Валландер. — Л.: Изд-во Ленинградского государственного университета им. А. А. Жданова, 1978. — 294 с.

14. Коптев А. В. Первый интеграл и пути дальнейшего интегрирования уравнений Навье – Стокса / А. В. Коптев // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. — 2012. — № 147. — С. 7–17.
15. Koptev A. V. Generator of Solution for 2D Navier – Stokes Equations / A. V. Koptev // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. — 2014. — Vol. 7. — № 3. — Pp. 324–330.
16. Koptev A. V. The Structure of Solution of the Navier – Stokes Equations / A. V. Koptev // Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ. — 2014. — Т. 3. — № 6. — С. 656–660. DOI:10.1134/S2304487X1406008X.
17. Коптев А. В. Как разрешить 3D уравнения Навье – Стокса / А. В. Коптев // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. — 2015. — № 173. — С. 7–15.
18. Koptev A. V. Perspectives of Solution of the Navier – Stokes equations / A. V. Koptev // International Conference on Mathematical Control Theory and Mechanics. — Suzdal, 2015. — Pp. 172–174.
19. Панченков А. Н. Асимптотические методы в задачах оптимального проектирования и управления. / А. Н. Панченков, Г. М. Ружников [и др.]. — Новосибирск: Наука, 1983. — 265 с.

THEORETICAL RESEARCH OF THE FLOW AROUND CYLINDER OF AN IDEAL INCOMPRESSIBLE MEDIUM IN THE PRESENCE OF A SHIELDING EFFECT

We offer an analytical solution method for plane problem of an ideal steady incompressible fluid flow around a circular cylinder in the presence of the shielding surface. The method is based on solving a boundary value problem for the equations of steady motion of an ideal incompressible fluid with the boundary conditions of impermeability along the streamlined contours of the cylinder and the shielding surface. As the constitutive equations we use integral of the Euler equations for 2D steady motion of an ideal incompressible fluid. In the result of solving the problem using asymptotic methods derived new formulas that determine the lift force and the drag of the streamlined body as functions of initial parameters. The formulas obtained are fair at the small sizes of a streamline body in comparison with the sizes of the running stream. Using the standard software package of Maple programs we performed calculations and found out the values of these quantities for different values of input parameters with regard to shielding effect.

Keywords: overflow, circular cylinder, ideal incompressible fluid, shielding surface, equation, integral, lift force, drag, shielding .effect.

REFERENCES

1. Belavin, N. I., *Ekranoplana*. Leningrad: Sudostroenie, 1977.
2. Maskalik, A. I., R. A. Nagapetjan, and A. Ja. Vol'fenzon. *Krylatye suda Rossii: Istorija i sovremennost*. SPb.: Sudostroenie, 2006.
3. Maskalik, A. I., et al. *Ekranoplani. Osobennosti teorii I proektirovania*. SPb.: Sudostroenie, 2000.
4. Petrov, G. F. *Gidrosamolety i jekranoplany Rossii: 1910-1999*. M.: Rusavia, 2000.
5. Nebilov, A. V., and V. A. Nebilov. "Rossiiskie ekranoplani: novie perspektivi v megdunarodnom sotrudnichestve". *Russkij inzhener* 4(39) (2013): 33–36.
6. Bolotin, A. A. "Mathematical modeling of wig vehicle motion during its take-off run." *Trudy NGTU* 5(102) (2013): 283–286.
7. Nebylov, A. V., and V. A. Nebylov. "Wing-in-ground Effect Vehicles: Modern Concepts of Design and New Role of Automatic Control." *3-rd European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS), EUCASS Association*. 2009: 1–10.
8. Lange, R. H., and J. W. Moor. "Large Wing-in-Ground Effect Transport Aircraft." *Journal of aircraft* 17.4 (1980): 260–266.
9. Frolov, K. V., and V. A. Frolova. "Nesjimaemoe potentsialnoe techenie okolo cilindra pri nalichii ekranirujusei poverhnosti." *Sovremennye problemy fundamental'nyh i prikladnyh nauk. Chast' 6. Ajeromehanika i letatel'naja tehnika. – Materialy 52-oj nauchnoj konferencii MFTI*. M.: Jukovskii, 2009: 31–33.
10. Milne-Thomson, L. M. *Theoretical Hydrodynamics*. London: Macmillan and Co. LTD. New York: St. Martin's Press, 1960.
11. Kochin, N. E., I. A. Kibel, and N. V. Rose. *Teoreticheskaja gidromehanika. Ch. 2*. M.: Izd-vo fiz.-mat. lit., 1963.

12. Lojczanskiy, L. G. *Mehanika zhidkosti i gaza*. M.: Nauka, 1987.
13. Vollander, S. V. *Lecsii po Hidroatromechanike*. L.: Izd-vo Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta im. A.A. Zhdanova, 1978.
14. Koptev, A. V. "First Integral and Ways of Further Integration of Navier - Stokes Equations." *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences* 147 (2012): 7–17.
15. Koptev, Alexander V. "Generator of solutions for 2 D Navier–Stokes equations." *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* 7.3 (2014): 324–330.
16. Koptev, A. V. "The Structure of Solution of the Navier – Stokes Equations." *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI"* 3.6 (2014): 656–660. DOI:10.1134/S2304487X1406008X
17. Koptev, A.V. "How to Solve 3d Navier - Stokes Equations." *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences* 173 (2015): 7–15.
18. Koptev, A. V. "Perspectives of Solution of the Navier – Stokes equations." *International Conference on Mathematical Control Theory and Mechanics*. Suzdal, 2015: 172–174.
19. Panchenkov, A. N., G. M. Rujnikov, et al. *Asimptoticheskie metody v sadachah optimalnogo proektirovaniya I upravleniya*. Novosibirsk: Nauka (Siberian Department), 1983.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Коптев Александр Владимирович —
кандидат физико-математических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
Alex.Koptev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Koptev Aleksandr Vladimirovich —
Phd, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Alex.Koptev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2015 г.

УДК 531.31, 539.3

**В. Н. Глухих,
В. М. Петров,
Н. Ю. Сойгу**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ УПРУГОСТИ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ НАМОТКИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБОЛОЧЕК И СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СУДОСТРОЕНИИ И ПОРТОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

В статье рассмотрен новый многоуровневый подход, позволяющий на этапе проектирования конструкций из композитных материалов, полученных методом намотки, определить основные наиболее важные физико-механические характеристики для этих конструкций в зависимости от анизотропии, отвечающие за напряженно-деформированное состояние и критические нагрузки, приводящие к разрушению. Изложены результаты, которые показывают, что в плоскости, перпендикулярной волокнам, постоянные упругости могут иметь несколько экстремальных значений в зависимости от сочетания величин модулей упругости и коэффициентов поперечной деформации. Приведены результаты расчетов и построенные на их основе характерные кривые, подтверждающие анизотропию свойств основных физико-механических характеристик композиционного материала. В целом предложенная теория после дополнительных экспериментальных исследований может быть адаптирована не только для расчета оболочек из композиционных материалов, но и для других конструктивных исполнений.

Ключевые слова: композиционные материалы, математическая модель, цилиндрические оболочки, анизотропия свойств, модуль упругости, главные напряжения, постоянные упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига.

В СОВРЕМЕННОМ судостроении для изготовления оболочек корпусов, емкостей высокого давления, воздухопроводов и трубопроводов находят широкое применение композиционные полимерные материалы (стекло и углепластики), обладающие анизотропными свойствами. Наиболее важными этапами технологии изготовления подобных конструкций является получения исходной заготовки методом намотки с минимальным количеством дефектов, а также последующей механической обработки и сборки [1] – [3]. В технологическом процессе на этапе подготовки полимерной матрицы (фенольной или эпоксидной смолы) широко используют пластификаторы, наполнители и наномодификаторы, придающие изделию после отверждения особые эксплуатационные свойства [4]. На практике этап получения заготовки является не только этапом формообразования изделия, получения заданной точности и взаимного расположения поверхностей, но также этапом обеспечения показателей качества и требуемых физико-механически характеристик (предела прочности, упругости, реологических параметров и т. п.), определяющих не только основные эксплуатационные свойства, но и надежность, а также ресурс агрегатов и узлов в целом.

В данной статье рассмотрен новый подход, позволяющий на этапе проектирования конструкций из композитных материалов, полученных методом намотки с достаточной полнотой для инженерных расчетов, осуществлять вычисления отдельных физико-механических характеристик, таких как величины модулей упругости, коэффициенты поперечной деформации, и моделировать напряженное и деформированное состояние композиционного материала в конструкции. Анизотропии характеристик упругости различных анизотропных материалов, в том числе полимерных композиционных, при условии экстремальных условий эксплуатации, были посвящены работы Е. К. Ашкенази, А. Н. Митинского и многих других [5] – [7]. Отсутствие математических зависимостей между постоянными упругости в главных направлениях анизотропии приводило к получению противоречивых результатов теоретических и экспериментальных исследований [8], [9].

В результате проведенных исследований [3], [10] было установлено, что в плоскости, перпендикулярной волокнам, постоянные упругости могут иметь либо два, либо три экстремальных значения в зависимости от сочетания величин модулей упругости и коэффициентов поперечной деформации. От того, насколько достоверно найдены постоянные упругости в любом произвольном направлении, зависят результаты исследования напряженного и деформированного состояния композиционного материала.

Основные схемы наливки, используемые при расчетах и моделировании, приведены на рисунке.

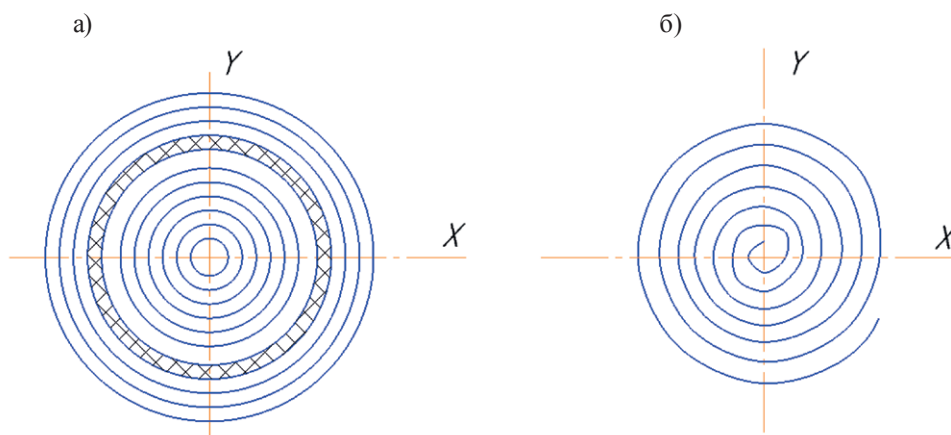


Схема намоточного композита: а — радиальная; в — по спирали

Для проверки теоретических предпосылок расчета конкретных физико-механических характеристик, в зависимости от свойств намоточных композиционных материалов и конструктив-

ного исполнения, требуется экспериментальное исследование вырезанных образцов известными методами испытаний на разрывных машинах. На основе использования дифференциального уравнения IV порядка в частных производных с двумя переменными и функции напряжений в виде суммы полиномов удалось установить математическую связь между постоянными упругости в главных направлениях анизотропии:

$$F = \sum_{i=1}^n x^k f_k(y), \quad (1)$$

где $f_k(y)$ — неизвестная функция, удовлетворяющая дифференциальному уравнению

$$G_{ar} = \frac{Er}{3 - \alpha_2^2 + 2\mu_{ka}}, \quad (2)$$

где $\alpha_2^2 = \frac{Er}{Ea}$.

Из зависимости (2) в результате простого математического преобразования можно получить равенство

$$\frac{Er}{Gra} - 2\mu_{ra} = 3 - \alpha_2^2. \quad (3)$$

Левая часть равенства (3) входит в качестве множителя в дифференциальное уравнение и ранее определялась на основе экспериментальных исследований. Правая часть представляет собой найденное теоретическое значение левой части, удовлетворяющей дифференциальному уравнению IV порядка в частных производных для цилиндрически анизотропного ортотропного тела.

Далее, по аналогии с полученными предыдущими зависимостями, для составляющих модуля сдвига можно записать выражения:

$$G_{at} = \frac{Et}{3 - \alpha_3^2 + 2\mu_{ra}}, \quad (4)$$

где $\alpha_3^2 = \frac{Et}{Ea}$;

$$G_{rt} = \frac{Et}{3 - \alpha^2 + 2\mu_{tr}}, \quad (5)$$

где $\alpha^2 = \frac{Et}{Ea}$,

вместо формулы

$$G_{ik} = \frac{E_{ik}^{45}}{2(1 + \mu_{ik}^{45})}, \quad (6)$$

в которую требуется подставить постоянные упругости в направлении под 45° к главным осям анизотропии.

Таким образом, множители $\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{Er}$ и $\frac{4}{E_{xy}^{45}} - \frac{1}{Er} - \frac{1}{Et}$ равны отношению $\frac{B}{Et}$, которое может быть представлено двумя значениями: $B = 3 - \alpha^2$; $B = \frac{1 + 5\alpha^2}{3}$ на основе решения алгебраического уравнения 2-го порядка, полученного после решения и преобразований дифференциального уравнения. При этом $E_{xy}^{45} = Et$ либо $\frac{1}{E_{xy}^{45}} = \frac{1 + 2\alpha^2}{3Et}$ в соответствии с двумя приведенными ранее значениями B .

Модули упругости в произвольных направлениях представлены в виде

$$\frac{1}{E_{x'}} = \frac{\cos^4 \Theta}{Er} + \frac{\sin^4 \Theta}{Et} + \frac{3 - \alpha^2}{Et} \sin^2 \Theta \cos^2 \alpha \quad (7)$$

либо

$$\frac{1}{E_{x'}} = \frac{\cos^4 \Theta}{E_r} + \frac{\sin^4 \Theta}{E_t} + \frac{1+5\alpha^2}{3Et} \sin^2 \Theta \cos^2 \alpha. \quad (8)$$

Аналогичные уравнения в других плоскостях анизотропии:

$$\frac{1}{E_{z'}} = \frac{\cos^4 \beta}{E_a} + \frac{\sin^4 \beta}{E_r} + \frac{3-\alpha^2}{Er} \sin^2 \beta \cos^2 \beta \quad (9)$$

либо

$$\frac{1}{E_{z'}} = \frac{\cos^4 \beta}{E_a} + \frac{\sin^4 \beta}{Er} + \frac{1+5\alpha^2}{3Er} \sin^2 \beta \cos^2 \beta \text{ и т. д.} \quad (10)$$

Коэффициенты Пуассона:

$$\mu_{x'y'} = \frac{2(1-\alpha^2) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta - \frac{3-\alpha^2}{2} \frac{Et}{2Grt}}{\alpha^2 \cos^4 \Theta + (3-\alpha^2) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta + \sin^4 \Theta} \quad (11)$$

либо

$$\mu_{x'y'} = -E_{x'} \left[\left(\frac{1}{Er} + \frac{1}{Et} - \frac{3-\alpha^2}{Et} \right) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta + \frac{3-\alpha^2}{2Et} - \frac{1}{2Grt} \right]; \quad (12)$$

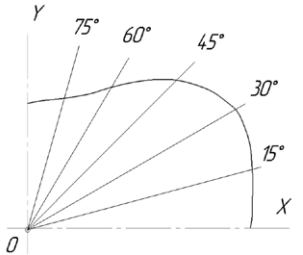
$$\mu_{x'y'} = -E_{x'} \left[\left(\frac{1}{Er} + \frac{1}{Et} - \frac{1+5\alpha^2}{3Et} \right) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta + \frac{1+5\alpha^2}{6Et} - \frac{1}{2Grt} \right] \quad (13)$$

и т. д. для других плоскостей анизотропии.

На основе полученных зависимостей (1) – (13) были составлены алгоритм и программа для расчета параметров характеризующих упруго-пластические характеристики в зависимости от варьируемых углов наклона. Подпрограмма реализована в среде MathCad. Основные результаты расчетов и их графическая интерпретация приведены в следующей таблице.

Результаты расчетов и построенные на основе моделирования характерных кривых, подтверждающих анизотропию свойств основных физико-механических характеристик композиционного материала

Наименование параметра	Характерные кривые, полученные в результате расчетнопо зависимостям (1) – (13)	Математические зависимости
1. Анизотропия модуля упругости в поперечном сечении композита		$1 - B_{(1)} = 3 - \alpha^2;$ $E_{xy}^{45} = Et;$ $2 - B_{(2)} = \frac{1+5\alpha^2}{3};$ $E_{xy}^{45} = \frac{3Et}{1+2\alpha^2}$
2. Анизотропия модуля сдвига		$1 - B_{(1)} = 3 - \alpha^2;$ $G_{rt} = \frac{Et}{3 - \alpha^2 + 2\mu_{tr}};$ $2 - B_{(2)} = \frac{1+5\alpha^2}{3};$ $G_{rt} = \frac{3Et}{1+5\alpha^2 + 6\mu_{tr}};$ $\frac{1}{G_{x'y'(2)}^{45}} = \frac{1+3\alpha^2 + 4\mu_{tr}}{2Et};$ $\frac{1}{G_{x'y'(1)}^{45}} = \frac{\alpha^2 + 1 + 2\mu_{tr}}{Et}$

3. Анизотропия коэффициента Пуассона		$B_{(1)} = 3 - \alpha^2$
--------------------------------------	---	--------------------------

Примечание. Схемы иллюстрируют визуальное изменение параметра (анизотропию свойств) в зависимости от угла наклона в выбранной системе координат.

Выводы

1. Представленная методика и теория постоянных упругости разработаны для цилиндрически анизотропного тела с радиальной навивкой материала (ткани или отдельных нитей), при этом отдельные зависимости могут быть удовлетворительными и для решения задач общей анизотропии. Данное утверждение требует дополнительной экспериментальной проверки с целью получения уточняющих коэффициентов.

2. Предполагается, что развитие данной теории позволит выполнять с помощью полученных зависимостей геометрические и физические расчеты оболочек и стержней различных конструктивных исполнений, широко применяемых в судостроении и элементах портовой инфраструктуры. Отдельно можно выделить перспективные направления проектирования сосудов и оболочек высокого давления, крупногабаритных наружных легких корпусов, трубопроводов и длинномерных стержневых конструкций. При достаточных предварительных испытаниях на образцах можно существенно сократить затраты и время натурных испытаний реальных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абозин И. Ю. Некоторые вопросы механической лезвийной обработки углепластиков / И. Ю. Абозин, В. М. Петров // Вопросы материаловедения. — 2001. — № 2. — С. 86–92.
2. Безпальчук С. Н. Обобщенная модель состояния качества поверхности ответственных деталей судовых энергетических установок выполненных из композиционных углепластиков / С. Н. Безпальчук, А. А. Буцанец, В. М. Петров // Вестник Государственного морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 97–102.
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 морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 66–73.
4. Пат. 2188834. Российская Федерация. Антифрикционная композиция / В. В. Рыбин, В. М. Петров, А. Н. Пономарев, Ю. В. Абозин, В. Е. Бахарева, М. В. Малинок, В. А. Никитин; заявитель и патентообладатель ЗАО «АСТРИН-ХОЛДИНГ», ФГУП НИИКМ «Прометей». — № 18138; Заявлено 12.01.2004; Оpubл. 20.02.2004; Номер и год публикации бюллетеня 5-2004.
5. Ашкенази Е. К. Построение предельных поверхностей для плоского напряженного состояния анизотропных материалов / Е. К. Ашкенази // Заводская лаборатория. — 1964. — № 2. — С. 225–227.
6. Григорович В. К. О наиболее выгодном направлении волокон в изделиях из анизотропных материалов / В. К. Григорович, Н. Д. Соболев, Я. Б. Фридман // ДАН СССР. — 1952. — Т. 86. — № 4. — С. 703–706.
7. Росато Д. В. Намотка стеклонитью / Д. В. Росато, К. С. Грове; под ред. В. А. Гречишкина. — М.: Машиностроение, 1969. — 310 с.
8. Темнов В. Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике / В. Г. Темнов. — СПб.: Компьютербург, 2001. — 61 с.
9. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. — М.: Наука, 1977. — 415 с.
10. Глухих В. Н. Связь между упругими постоянными цилиндрическими анизотропного тела / В. Н. Глухих // Вестник международной академии холода. — 2008. — № 1. — С. 32–34.

DETERMINATION OF ELASTICITY CONSTANTS WITH ANISOTROPY OF PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS USED FOR WINDING THE RESPONSIBLE SHELL AND BEAM STRUCTURES IN SHIPBUILDING AND PORT INFRASTRUCTURE

The article describes a new multilevel approach on the design phase of structures made of composite materials obtained by winding to determine the essential for the design of physical-mechanical characteristics, depending on the anisotropy responsible for the stress-strain state and the critical loads leading to destruction. The article presents the results which show that in the plane perpendicular to the continuous fibres of elasticity can have several extreme values depending on the combination of values of modules of elasticity and coefficients of transverse deformation. Results of calculations and built on the basis of the characteristic curves confirming the anisotropy of the properties of the basic physico-mechanical characteristics of the composite material. In General the proposed theory, after further experimental studies. can be adapted not only for calculation of shells made of composite materials, but also for other structural designs.

Keywords: composite materials, mathematical model, cylindrical shell, anisotropy properties, modulus of elasticity, principal stresses, the constant of elasticity, Poisson's ratio, shear modulus.

REFERENCES

1. Petrov, V. M., and I. Yu. Abozin. "Some problems of the cutting-tool edge machining of carbon-reinforced plastics." *Inorganic Materials: Applied Research* 2 (2001): 86–92.
2. Bezpalcuk, S. N., A. A. Bucanec, and V. M. Petrov. "Generalized model of the quality status of surface critical parts of ship power plants made of composite plastics." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 97–102.
3. Beleckij, E. N., V. M. Petrov, and S. N. Bezpalcuk. "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 morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 66–73.
4. Rybin, V. V., V. M. Petrov, A. N. Ponomarev, Ju. V. Abozin, V. E. Bahareva, M. V. Malinok, and V. A. Nikitin. Antifrikcionnaja kompozicija. Russian Federation, assignee. Patent № 2188834.10 Sept. 2002. 12 Jan. 2004.
5. Ashkenazi, E. K. "Postroenie predelnyh poverhnostej dlja ploskogo naprjazhennogo sostojanija anizotropnyh materialov." *Industrial Laboratory* 2 (1964): 225–227.
6. Grigorovich, V. K., N. D. Sobolev, and Ja. B. Fridman. "O naivyygodnejshem napravlenii volokon v izdelijah iz anizotropnyh materialov." *DAN SSSR* 86.4 (1952): 703–706.
7. Rosato, D. V., and K. S. Grove. *Namotka steklonitju*. M.: Mashinostroenie, 1969.
8. Temnov, V. G. *Konstruktivnye sistemy v prirode i stroitelnoj tehnike*. SPb., Kompjuterburg, 2001.
9. Lehnickij, S. G. *Teorija uprugosti anizotropnogo tela*. M: Nauka, 1977.
10. Gluhih, V. N. "Relation between elastic constants of cylindrically anisotropic body." *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda (Journal of IAR)* 1 (2008): 32–34.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Глухих Владимир Николаевич —
доктор технических наук, доцент.
СПбГАСУ
tehmeh@spbgasu.ru
Петров Владимир Маркович —
доктор технических наук, профессор.
СПбГАСУ
tribotex@narod.ru
Сойту Наталья Юрьевна —
кандидат технических наук, доцент.
СПбГАСУ
natali_s01@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gluhik Vladimir Nikolaevich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
SPSUACE
tehmeh@spbgasu.ru
Petrov Vladimir Markovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
SPSUACE
tribotex@narod.ru
Sojtu Natalja Jurevna —
PhD, associate professor.
SPSUACE
natali_s01@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2016 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.31:658.58

А. В. Саушев,
Н. В. Широков

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Статья посвящена одной из важнейших задач технической диагностики, такой как определение состояния динамической системы в процессе ее эксплуатации. Рассматриваются методы решения этой задачи применительно к классу электротехнических систем. При этом диагностическими параметрами являются внутренние параметры системы, определяющие состояние ее комплектующих элементов. Показано, что для оценки состояния системы и определения ее запаса работоспособности необходима информация о границе области работоспособности. В работе предполагается задание области работоспособности в виде множества граничных точек, а также в форме аналитического описания ее границы. Получены правила распознавания принадлежности или непринадлежности вектора фактического состояния системы области работоспособности, которые определяются формой ее задания. Проанализированы алгоритмы вычисления запаса работоспособности электротехнической системы. Определены сферы применения каждого алгоритма, которые обусловлены формой задания области работоспособности, ее видом и размерностью пространства диагностических параметров. Разработанные методы и алгоритмы апробированы на тестовых примерах и реальных электротехнических системах.

Ключевые слова: электротехническая система, область работоспособности, контроль состояния, запас работоспособности, диагностические параметры.

ОДНОЙ из важнейших задач технической диагностики является оценка состояния динамических систем в процессе их эксплуатации. Для электротехнических систем (ЭТС) эта задача сводится, прежде всего, к определению работоспособности или неработоспособности системы. При этом крайне важно решить и еще одну задачу — определить запас работоспособности ЭТС. Известные методы диагностирования состояния ЭТС либо не позволяют решить эту задачу, либо решают ее, но с большой методической погрешностью, которая резко возрастает с увеличением числа диагностических параметров. ЭТС отличаются большим схемным разнообразием и сложностью. Требования, которые предъявляются к их функционированию, постоянно ужесточаются, а режимы работы и условия эксплуатации достаточно часто являются тяжелыми и изменчивыми, о чем свидетельствуют данные, приведенные в работах [1], [2]. Таким образом, задача оценки действительного состояния ЭТС, включая определение с заданной точностью запаса работоспособности системы, в настоящее время приобретает особую актуальность. Для раскрытия сути предлагаемых методов решения поставленной задачи следует остановиться на основных понятиях, используемых в настоящей работе. Под ЭТС, согласно работе [3], будем понимать техническую систему, предназначенную для получения, распределения, преобразования, использования электрической энергии и управления этими процессами.

Элементами ЭТС являются электротехнические устройства (ЭТУ). Любое ЭТУ с системных позиций также состоит из совокупности связанных между собой элементов. Отдельные элементы — это части или компоненты ЭТУ, предназначенные для выполнения определенных функций и не подлежащие дальнейшему разбиению на части. Таким образом, любое ЭТУ также может рассматриваться как ЭТС.

Состояние ЭТС в любой фиксированный момент времени характеризуется некоторым набором (вектором) параметров, к которым следует отнести:

– входные параметры: $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_e)$, характеризующие задающие воздействия $\mathbf{u}(t)$ и наблюдаемые на входах системы. Задающие воздействия подразделяются на *управляющие воздействия*, характеризующие рабочие режимы работы ЭТС, и *тестовые (пробные) воздействия*, которые имеют место в режимах наладки и технического диагностирования ЭТС;

– внешние параметры: $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_p, \dots, v_f)$, характеризующие свойства внешней по отношению к ЭТС среды и оказывающие влияние на ее функционирование. К таким воздействиям, например, относятся воздействия окружающей среды: температура, влажность, вибрация и радиация;

– внутренние параметры $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$, характеризующие состояние комплектующих элементов ЭТС, называемые также *первичными параметрами*. К этим параметрам относятся как параметры самих элементов (величины сопротивлений, индуктивностей, емкостей, масс, моментов инерции, жесткостей упругих связей), так и функции этих параметров, имеющие определенный физический смысл (коэффициенты усиления, постоянные времени, соотношения масс);

– внутренние параметры $\mathbf{u}^v = (u_1^v, \dots, u_k^v, \dots, u_e^v)$ и $\mathbf{Z}^v = (Z_1^v, \dots, Z_g^v, \dots, Z_c^v)$, характеризующие, соответственно, сигналы на входах и выходах ЭТУ, входящие как элементы $v = \overline{1, h}$, где h — число элементов в составе ЭТС;

– выходные параметры $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$, характеризующие свойства ЭТС, интересующие потребителя. Они представляют собой параметры-функционалы, т. е. функциональные зависимости фазовых переменных $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g, \dots, Z_c)$ ЭТС, и параметры, являющиеся граничными значениями диапазонов внешних переменных, в которых сохраняется работоспособность системы. Эти параметры, как правило, являются показателями качества, характеризующими правильность функционирования системы [1].

ЭТС может находиться в различных состояниях. Определение категории «состояние» и анализ видов состояний применительно к различным ЭТС рассмотрены в работе [1]. Важнейшим состоянием, которое подлежит распознаванию при диагностировании технических систем, является *работоспособное состояние (работоспособность)*. Под работоспособным состоянием обычно понимается состояние системы, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации. Это определение закреплено ГОСТ 27.002-89 [4]. Вместе с тем, в ГОСТ Р 27.002-2009 [5] работоспособность изделия, под которым можно понимать ЭТС или отдельно взятое ЭТУ, определяется как состояние изделия, способное выполнить требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы. Данное определение предполагает, что изделие в одно и то же время может находиться в работоспособном состоянии для одних функций и в неработоспособном состоянии для других. Таким образом, приведенное определение работоспособности фактически сводится к понятию правильного функционирования, которое было сформулировано в ГОСТ 20911-89 [6].

В настоящей работе, учитывая требования практики, под работоспособностью ЭТС будем понимать такое ее состояние, при котором значения параметров системы, характеризующих способность выполнять заданные функции, находятся в допустимых пределах. Эти пределы неразрывно связаны с условиями работоспособности ЭТС. Прежде чем дать словесную, аналитическую и геометрическую формулировки условий работоспособности ЭТС, введем в рассмотрение опорные значения параметров, характеризующих состояние ЭТС. Для первичных параметров \mathbf{X} ЭТС такими опорными значениями являются:

$X_{\text{ном}}$ — номинальное значение, которое указывается в инструкциях по обслуживанию на основании расчетов или специальных испытаний для начального периода эксплуатации и служит началом отсчета отклонений. В том случае, если это значение установлено в результате выполнения операции оптимизации по какому-либо критерию, оно также называется *оптимальным значением параметра*;

$X_{\text{доп}}$ — допустимое значение, т. е. установленное инструкцией наибольшее или наименьшее значение параметра, при достижении которого, как правило, резко ухудшается качество функционирования ЭТС;

$X_{\text{пред}}$ — предельное значение, которое может быть обусловлено невозможностью его физической реализации (сопротивление резистора, например, может быть только положительным) или при котором теряется работоспособность функциональных узлов, находящихся на более низком иерархическом уровне относительно элементов рассматриваемой системы. Для ЭТС как совокупности ЭТУ элементами таких устройств, например, являются генератор линейно изменяющегося напряжения, фазосмещающее устройство и др. В пределе на самом низшем иерархическом уровне к таким функциональным узлам относятся активные комплектующие элементы: тиристоры, транзисторы, операционные усилители, оптроны и др. Для опорных значений параметров X справедливо соотношение вида

$$|X_{\text{ном}}| < |X_{\text{доп}}| \leq |X_{\text{пред}}|.$$

Для выходных параметров Y и внутренних параметров Z^v к опорным параметрам относятся:

$Y_{\text{доп}}(Z^v_{\text{доп}})$ — допустимое, наибольшее или наименьшее значение параметра, которое определяется техническими требованиями, устанавливаемыми при составлении технического задания на стадии проектирования ЭТУ. Технические требования определяют допустимые уровни показателей качества при функционировании системы. Выход параметров $Y(Z^v)$ за установленные для них допустимые пределы приводит к потере работоспособности ЭТС, однако это не означает потерю способности системы выполнять все возложенные на нее функции, а ведет лишь к снижению эффективности ее использования по назначению;

$Y_{\text{пред}}(Z^v_{\text{пред}})$ — предельное значение параметра, т. е. такое расчетное наибольшее или наименьшее его значение, при достижении которого наступает предельное состояние системы и функционирование ее с точки зрения выполнения возложенных на нее функций становится невозможным;

$Y_{\text{кр}}(Z^v_{\text{кр}})$ — критическое значение параметра, при котором работа системы принципиально невозможна.

Для опорных значений выходных параметров Y ЭТС и выходных параметров Z^v ЭТУ выполняется соотношение

$$|Y_{\text{доп}}(Z^v_{\text{доп}})| < |Y_{\text{пред}}(Z^v_{\text{пред}})| \leq |Y_{\text{кр}}(Z^v_{\text{кр}})|.$$

Важным результатом анализа является ответ на вопрос о том, выполняются ли условия работоспособности, под которыми понимаются необходимые условия безотказной работы ЭТС, выраженные в виде неравенства.

Можно выделить внешние и внутренние условия работоспособности, устанавливаемые при проектировании ЭТС [7]. Под *внешними условиями* работоспособности будем понимать условия, выполнение которых необходимо для того, чтобы ЭТС функционировала с требуемыми показателями качества. Данные условия определяются заданными соотношениями между выходными параметрами Y системы и техническими требованиями к ним. Под *внутренними условиями* работоспособности будем понимать условия, при которых ЭТУ как элементы ЭТС способны выполнять возложенные на них функции, сохраняя при этом работоспособное состояние. Данные условия определяются заданными соотношениями между внутренними параметрами Z^v ЭТУ и их допустимыми значениями, а также между первичными параметрами системы X и их предельными значениями.

Условия работоспособности могут быть *односторонними* и *двухсторонними*, причем для второго (более общего) случая они имеют вид:

$$\begin{aligned} Y_{j\min} \leq Y_j = F_j(\mathbf{X}) \leq Y_{j\max}, \quad j = \overline{1, m}; \\ Z^v_{j\min} \leq Z^v_j = F^v_j(\mathbf{X}) \leq Z^v_{j\max}, \quad v = \overline{1, h}; \\ X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max}, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $Y_{j\max}(Z_{j\max}^v)$, $Y_{j\min}(Z_{j\min}^v)$, $Y_j(Z_j^v)$ — соответственно максимально допустимое, минимально допустимое и текущее значения j -го выходного (внутреннего) параметра; $F_j(\mathbf{X})$ и $F_j^v(\mathbf{X})$ — операторы связи первичных параметров ЭТС с ее выходными Y и внутренними Z параметрами соответственно.

Первое неравенство в системе неравенств (1) является внешним условием работоспособности и с геометрической точки зрения определяет допусковую область $D_Y = \bigcap_{j=1}^m D_j$ пространства выходных параметров. Область D_Y имеет вид m -мерного бруса евклидова пространства R^m . Каждому ограничению $D_j = D_{j\min} \cap D_{j\max}$ значений выходных параметров, определяемому неравенствами $D_{j\min} = F_j(\mathbf{X}) - Y_{j\min} \geq 0$ и $D_{j\max} = Y_{j\max} - F_j(\mathbf{X}) \geq 0$, $j = \overline{1, m}$ в n -мерном евклидовом пространстве R^n первичных параметров, соответствует область M_j (при одностороннем ограничении — гиперповерхность). Это соотношение можно представить в виде отображения $\Phi_{YX} : D_Y \rightarrow M_Y$ множеств $D_Y = \bigcap_{j=1}^m D_j$ и $M_Y = \bigcap_{j=1}^m M_j$.

Второе неравенство в системе неравенств (1) является внутренним условием работоспособности и с геометрической точки зрения определяет допусковую область $D_Z = \bigcap_{v=1}^h D_v$, $v = \overline{1, h}$ пространства внутренних параметров Z^v , которая по виду соответствует области D_Y . Аналогично ранее изложенному, каждому ограничению D_v , согласно отображению $\Phi_{ZX} : D_Z \rightarrow M_Z$, в пространстве R^n соответствует допусковая область M_v . При этом $M_Z = \bigcap_{v=1}^h M_v$, $v = \overline{1, h}$.

Третье неравенство в системе неравенств (1) также является внутренним условием работоспособности и с геометрической точки зрения определяет допусковую область D_X , которая так же, как и области D_Y и D_Z , имеет форму бруса: $D_X = \{ \mathbf{X} \in R^n | X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max}, i = \overline{1, n} \}$. Множество $G = D_X \cap M_Z \cap M_Y$, являющееся пересечением областей D_X , M_Z и M_Y , называют *областью работоспособности*. Эта область определяет множество допустимых значений первичных параметров, при которых выполняются все требования, предъявляемые к выходным и внутренним Z^v параметрам ЭТС.

Диагностическими параметрами в данной работе являются первичные параметры \mathbf{X} . Это обусловлено тем, что именно первичные параметры, в конечном счете, определяют состояние ЭТС. Кроме того, лишь в пространстве параметров \mathbf{X} возможно определение важнейшего показателя системы запаса работоспособности, под которым понимается степень приближения вектора фактического состояния системы к его предельно допустимому значению [8]. Методы оценки состояния ЭТС в пространстве измеряемых характеристик, основанные на использовании информации о границе области работоспособности, в настоящей статье не рассматриваются и частично изложены в работах [9], [10].

Для оценки состояния ЭТС в пространстве первичных параметров требуется установить, находятся ли измеренные значения параметров \mathbf{X} в области работоспособности. Область работоспособности может быть задана в виде множества граничных точек или в виде гиперповерхности, ограничивающей область допустимых значений первичных параметров. Для задания области работоспособности массивом граничных точек разработаны методы и реализующие их алгоритмы, основанные на дискретном и непрерывном поиске координат этих точек [7]. Для технической реализации методов поиска и хранения граничных точек требуется достаточно большой объем памяти. Вместе с тем вычислительные возможности современных компьютеров позволяют реализовывать разработанные алгоритмы поиска граничных точек при достаточно большом числе первичных параметров [7], [11]. Точное решение задачи описания области работоспособности гиперповерхностью возможно лишь для простейших систем с небольшим числом параметров [7].

Области работоспособности ЭТС обычно имеют сложную форму и могут быть *невыпуклыми* и *неодносвязными* [7]. В целях контроля состояния системы и для решения задач параметрического синтеза [8] реальную область работоспособности аппроксимируют более простыми фигурами. Известно три основных способа аппроксимации области работоспособности [7].

Первый способ предполагает замену области работоспособности гиперпараллелепипедом (брусом), грани которого параллельны осям координат. Построенная таким образом область работоспособности определяет независимые допуски, т. е. допуск на каждый из параметров ЭТС не зависит от значений других параметров. В этом случае оценка состояния ЭТС производится с помощью алгоритма контроля по независимым допускам. Если все первичные параметры находятся в пределах своих допусков, то принимается решение о работоспособности системы [12]. Данный способ является наиболее известным и широко применяемым на практике. Вместе с тем, этому способу присущи два существенных недостатка. Во-первых, задача построения гиперпараллелепипеда (бруса) является достаточно сложной и для общего случая, когда область работоспособности является неодносвязной, применительно к рассматриваемой задаче не имеет решения. Во-вторых, и это самое существенное, с ростом размерности пространства первичных параметров методическая погрешность такой аппроксимации резко нелинейно возрастает. Полученные оценки методической погрешности [7] позволяют сделать вывод о том, что при числе параметров $n = 5$ погрешность такой аппроксимации может превышать 90 %. Таким образом, несмотря на свою относительную простоту, данный подход не рекомендуется к использованию для оценки состояния ЭТС.

Второй способ предполагает переход от независимых допусков к зависимым допускам, в виде линейных ограничений. Область работоспособности при этом аппроксимируется линейными гиперповерхностями, что позволяет существенно снизить методическую погрешность. Известные алгоритмы решения задачи рассмотрены в работе [7]. Для аппроксимации области работоспособности линейно-зависимыми допусками, она должна быть задана множеством граничных точек. Известно несколько методов и реализующих их алгоритмов, которые позволяют решить эту задачу. Все они делятся на методы дискретного и непрерывного поиска граничных точек [7].

Третий способ позволяет получить наиболее точную аппроксимацию области работоспособности. Его идея заключается в независимой друг от друга аппроксимации каждой из гиперповерхностей, составляющих область работоспособности. Для этой цели удобно использовать методы планирования эксперимента [13]. Далее, используя свойства логических R -функций, в качестве которых, например, выступают полученные в результате проведенного активного эксперимента полиномиальные зависимости, формируется единая аналитическая зависимость, которая с высокой точностью аппроксимирует область работоспособности. Форма области работоспособности при этом может быть произвольной [7], [14].

При разработке методов оценки состояния ЭТС необходимо учитывать исходные данные, размерность системы и априорную информацию о форме и задании области работоспособности. Будем считать, что известны координаты диагностируемых параметров X_i , определяющих точку R_i в их пространстве. Такую информацию обычно получают экспериментальным путем на основе использования разработанных методов идентификации ЭТС, рассмотренных в работах [15], [16].

Методы контроля состояния ЭТС должны иметь критерии, позволяющие распознавать принадлежность любой произвольной точки R_i области работоспособности и оценивать запас работоспособности системы.

При контроле состояния ЭТС по независимым допускам задача решается весьма просто. Координаты точки R_i сравниваются независимо друг от друга с допусками (предельными координатами по каждому параметру) и при выполнении всех неравенств делается вывод о принадлежности точки области работоспособности и, как следствие, о работоспособном состоянии ЭТС. При более точной аппроксимации области работоспособности и переходе к зависимым допускам такое правило не работает.

Рассмотрим возможные методы решения поставленной задачи.

1. Метод последовательного перебора граничных точек области работоспособности.

Данный метод предполагает, что область задана множеством граничных точек. При отсутствии информации, определяющей количественную связь между первичными и выходными параметрами ЭТС, с целью распознавания принадлежности точки R_i области работоспособности объективно требуется натурный эксперимент и соответствующая измерительная аппаратура для проверки условий работоспособности (1). Исследования показали, что можно предложить альтернативные, значительно более удобные и эффективные правила распознавания. Для рассматриваемого случая, когда область работоспособности задана множеством граничных точек, можно воспользоваться методами механической и электрической аналогии [8], разработанными для решения задачи параметрического синтеза ЭТС по критерию запаса работоспособности.

Рассмотрим наиболее общий случай, когда область работоспособности имеет произвольную форму. Оптимальное значение внутренней точки R_0 при этом определяется в процессе поиска по целевой функции:

$$F = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(1 / \sum_{i=1}^n (R_i - X_{ik})^2 \right), \quad (2)$$

где N — общее число граничных точек области работоспособности, задающих ее границу ∂G ; n — число первичных (диагностических) параметров; X_{ik} — координаты граничных точек.

Значения функции F вычисляются в точках R_0 (если это значение априорно неизвестно) и R_i . Если $F(R_0) < F(R_i)$, то точка находится вне области работоспособности. В противном случае требуется дополнительный анализ. Если на отрезке прямой, соединяющей точки R_0 и R_i , функция F монотонно уменьшается от значения $F(R_0)$ к значению R_i , то исследуемая точка принадлежит области работоспособности и ЭТС находится в работоспособном состоянии.

Для проверки данного условия достаточно вычислить значение функции F в точке R_1 с координатами, отличающимися от координат точки R_i на величину ΔX_i в направлении к точке R_0 . Если $F(R_1) < F(R_i)$, то точка находится в области работоспособности. Действительно, в точке R_1 функция F претерпевает разрыв (рис. 1), ее значение стремится к бесконечности. Между точками R_0 и R_1 и точками R_i и R_1 функция F , как следует из выражения (2), при движении от точки R_0 к точке R_1 и от точки R_i к точке R_1 является монотонно возрастающей. Таким образом, если условие $F(R_1) < F(R_i)$ не выполняется, то это противоречит исходному утверждению.

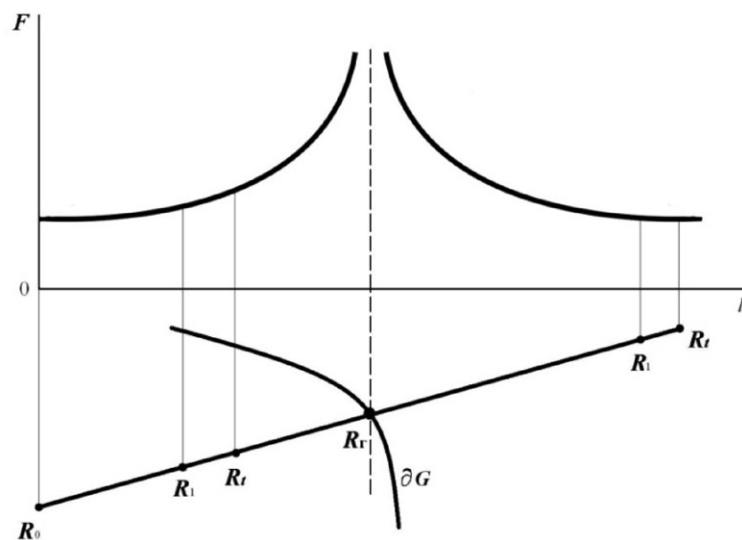


Рис. 1. Форма F -критерия для распознавания состояния ЭТС

Для оценки запаса работоспособности данный метод предполагает последовательный анализ всех граничных точек и вычисление расстояний в евклидовом пространстве R^n между каждой

граничной точкой и текущей точкой R_r , определяющей состояние ЭТС в данный момент времени. Наименьшее расстояние, при условии нахождения точки в области работоспособности, будет определять запас работоспособности ЭТС.

Метод требует больших вычислительных и, соответственно, временных затрат. Его идея проста и реализована в виде устройства для определения состояния технических объектов [17]. При числе диагностических параметров $n > 2$ использование данного метода нецелесообразно.

В том случае, если область работоспособности является выпуклой, а также известны координаты оптимальной по критерию запаса работоспособности точки R_0 , затраты времени на решение задачи можно существенно сократить, исключив из рассмотрения граничные точки, которые являются для этого случая избыточными.

Суть предлагаемого алгоритма сводится к следующему. Через точку R_0 проводятся взаимно перпендикулярные плоскости H_1, H_2, \dots, H_n , разбивающие область работоспособности на 2^n подобластей $(G_1, G_2, \dots, G_{2^n}) \in G$. Далее определяется подобласть $G_i \in G$, которой принадлежит точка R_r . С этой целью определяется знак каждой из координат:

$$(\text{sign}X_i > 0) \vee (\text{sign}X_i < 0), i = \overline{1, n}$$

и на основании полученной информации идентифицируется принадлежность точки R_r к некоторой подобласти G_i .

Граничную точку области работоспособности, наиболее близко расположенную к точке R_r , определяющей состояние ЭТС в рассматриваемый момент времени, назовем *близлежащей точкой*.

Сформулируем и докажем следующую теорему. Если в n -мерном пространстве R^n первичных параметров задана область работоспособности G , точка R_0 , определяющая максимально возможный запас работоспособности l_0 , и точка R_r , соответствующая реальному техническому состоянию ЭТС в рассматриваемый момент времени, то близлежащая граничная точка R_r^f не принадлежит подобласти $G_i \in G$, координаты точек которой A_1, \dots, A_N противоположны по знаку координатам точки R_r .

Для любой граничной точки области работоспособности справедливо неравенство

$$l_r \geq l_0. \quad (3)$$

Предположим противное. Пусть близлежащая граничная точка R_r^f принадлежит подобласти G_i . При этом $R_r^f \in \{A_1, \dots, A_N\}$, тогда можно записать:

$$l_0 = \sqrt{X_{1r}^2 + \dots + X_{ir}^2 + \dots + X_{mr}^2}; \quad (4)$$

$$l_r = \sqrt{X_{1r}^2 + \dots + X_{ir}^2 + \dots + X_{mr}^2}, \quad (5)$$

где $X_{1r}, \dots, X_{ir}, \dots, X_{mr}$ — координаты точки R_r^f ; $X_{1r}, \dots, X_{ir}, \dots, X_{mr}$ — координаты точки R_r .

Так как по условию теоремы X_{ir} и X_{ir} имеют разные знаки, каждое слагаемое подкоренного выражения (4) больше, чем величина соответствующего слагаемого подкоренного выражения (5). Отсюда следует, что $l_r < l_0$, что противоречит условию (3). Следовательно, предположение о принадлежности ближайшей граничной точки подобласти G_i является ложным и точка R_r^f не принадлежит подобласти G_i .

Использование предлагаемого алгоритма позволяет существенно сократить число граничных точек области работоспособности, которые используются для анализа при определении запаса работоспособности ЭТС.

2. Адаптивный метод матричного поиска. Метод предполагает, что каждая из функций-ограничений неравенства (1): $Y_{j \max} - F_j(\mathbf{X}) \geq 0$ и $F_j(\mathbf{X}) - Y_{j \min} \geq 0$, аппроксимирована конечным множеством линейных гиперповерхностей f_j , и допусковая область M задана следующей системой неравенств:

$$\sum_{j=1}^{2m} f_j(\mathbf{X}) \geq 0; f_j(\mathbf{X}) = b_{j0} + \sum_{i=1}^n b_{ji} X_i \geq 0.$$

Для формирования правила распознавания состояния ЭТС воспользуемся свойствами логических R -функций, к которым относятся линейные гиперповерхности $f_j(\mathbf{X})$ [3]. При этом область работоспособности может быть задана следующим неравенством:

$$(((\varphi_1 \wedge_{\alpha_1}^k \varphi_2) \wedge_{\alpha_2}^k \varphi_3) \wedge_{\alpha_3}^k \dots) \wedge_{\alpha_{(g-1)}}^k \varphi_d = \wedge_{g=1}^d \alpha_{(g)}^k \varphi_g \geq 0, \quad (6)$$

где $\wedge_{\alpha(g)}^k$ — R -конъюнкция R -функций φ_g , обеспечивающая возможность взятия k производных; $\alpha(g)$, $g = \overline{1, d}$ — величины, принадлежащие интервалу $\alpha(g) \in [-1; 1]$.

Если все ограничения (1) являются двухсторонними, то $d = 2(m+n)$. При этом для функций-ограничений $f_j(\mathbf{X}) : Y_{j\max} - F_j(\mathbf{X}) \geq 0$ и $F_j(\mathbf{X}) - Y_{j\min} \geq 0$ — $\varphi_g = f_j(\mathbf{X})$, $g = j$, $j = \overline{1, 2m}$, а для функций-ограничений $f_i(\mathbf{X}) : X_{i\max} - X_i \geq 0$ и $X_i - X_{i\min} \geq 0$ — $\varphi_g = f_i(\mathbf{X})$, $g = i$, $i = \overline{1, 2n}$. В формуле (6) могут быть опущены скобки и конечный результат не будет зависеть от последовательности свертки R -функций φ_g .

Для построения R -конъюнкции можно воспользоваться формулой [7]:

$$\varphi_1 \wedge \varphi_2 = 0,5(\varphi_1 + \varphi_2 - |\varphi_1 - \varphi_2|). \quad (7)$$

В развернутой форме записи функция $G(\mathbf{X})$, аналитически описывающая область работоспособности G , имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} G(X) = \varphi_{(d)} = 0,5(\varphi_{(d-1)} + \varphi_d - |\varphi_{(d-1)} - \varphi_d|); \\ \varphi_{(d-1)} = 0,5(\varphi_{(d-2)} + \varphi_{d-1} - |\varphi_{(d-2)} - \varphi_{d-1}|); \\ \dots \\ \varphi_{(g)} = 0,5(\varphi_{(g-1)} + \varphi_g - |\varphi_{(g-1)} - \varphi_g|); \\ \dots \\ \varphi_{(3)} = 0,5(\varphi_{(2)} + \varphi_3 - |\varphi_{(2)} - \varphi_3|); \\ \varphi_{(2)} = 0,5(\varphi_1 + \varphi_2 - |\varphi_1 - \varphi_2|). \end{array} \right. \quad (8)$$

Приравнивая функцию $G(\mathbf{X})$ нулю, получим уравнение $G(\mathbf{X}) = 0$, описывающее границу области работоспособности ЭТС. Записывая функцию $G(\mathbf{X})$ в виде R -конъюнкции функций $M(\mathbf{X})$ и $P(\mathbf{X})$, которые описывают, соответственно, области M и P , получим

$$G(\mathbf{X}) = 0,5(M(\mathbf{X}) + P(\mathbf{X}) - |M(\mathbf{X}) - P(\mathbf{X})|) \geq 0. \quad (9)$$

Для аналитического описания областей M и P в системе уравнений (8) нужно произвести следующие замены: $g = j$, $d = 2m$, $G(\mathbf{X}) = M(\mathbf{X})$ — для описания области M и $g = i$, $d = 2n$, $G(\mathbf{X}) = P(\mathbf{X})$ — для описания области P . В случае если $m = n = 2$, а первичные параметры заданы в относительных единицах, причем $X_{1\min} = X_{2\min} = -1$, $X_{1\max} = X_{2\max} = 1$, области P и M запишутся в виде следующих неравенств:

$$P(\mathbf{X}) = 0,5(2 - |X_1| - |X_2| - \||X_2| - |X_1|\|) \geq 0;$$

$$\begin{aligned} M(\mathbf{X}) = & 0,25(Y_{1\max} + Y_{2\max} - Y_{1\min} - Y_{2\min} - |2F_1(X_1, X_2) - Y_{1\max} - Y_{1\min}| - \\ & - |2F_2(X_1, X_2) - Y_{2\max} - Y_{2\min}| - |Y_{1\max} + Y_{2\min} - Y_{1\min} - Y_{2\max}| + \\ & + |2F_1(X_1, X_2) - Y_{2\max} - Y_{2\min}| - |2F_2(X_1, X_2) - Y_{1\max} - Y_{1\min}|) \geq 0. \end{aligned}$$

В работе [18] получено уравнение границы области G_μ , расположенной эквидистантно области G и внутри нее. При этом граничные точки областей G и G_μ располагаются относительно друг друга по направлению градиента к функции $G(\mathbf{X})$ на одинаковом расстоянии l .

Рассмотрим две граничные точки: $N \in f_j(\mathbf{X}) \in M$ и $N^\mu \in f_j^\mu(\mathbf{X}) \in M_\mu$. Координаты точки N^μ можно выразить через координаты точки N по формуле

$$X_i^\mu = X_i + \frac{(\partial f_j(\mathbf{X})/\partial X_i)l}{|\text{grad } f_j(\mathbf{X})|} = X_i + \frac{b_{ji}}{|\text{grad } f_j(\mathbf{X})|}l, \quad \text{grad } f_j(\mathbf{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial f_j(\mathbf{X})/\partial X_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n b_{ji}^2},$$

откуда
$$f_j^\mu(\mathbf{X}) = f_j(\mathbf{X}) - |\text{grad } f_j(\mathbf{X})|l. \quad (10)$$

Область M_μ аналитически описывается аналогично области M по формуле (8), в которой $\varphi_g = f_j^\mu(\mathbf{X})$, а функция M заменяется функцией M_μ . В том случае, если граничная точка принадлежит области P , координаты точки N^μ определяются выражением $X_i^\mu = X_i \pm l$. Аналитическое описание области P_μ аналогично описанию области P , при этом $\varphi_g = f_i^\mu(\mathbf{X})$. Из формулы (6) следует, что $G_\mu = 0,5(M_\mu + P_\mu - |M_\mu - P_\mu|) \geq 0$.

Критерий распознавания состояния ЭТС имеет следующий вид:

$$G_l(\mathbf{X}) = 0,5(M_l(\mathbf{X}) + P_l(\mathbf{X}) - |M_l(\mathbf{X}) - P_l(\mathbf{X})|). \quad (11)$$

В формуле (11) функция $M_l(\mathbf{X})$ вычисляется аналогично функции $M_\mu(\mathbf{X})$. Для этого в формуле (8), как это доказано в работе [18], следует заменить φ_g на $\varphi'_j(\mathbf{X})$, а вместо $M(\mathbf{X})$ писать $M_l(\mathbf{X})$. Функция $P_l(\mathbf{X})$ тождественно равна функции $P_\mu(\mathbf{X})$.

Пример. Пусть первичные параметры ЭТС выражены в относительных единицах, область работоспособности совпадает с областью M и определяется ограничениями:

$$\begin{aligned} f_1(X_1, X_2) &= X_1 + 4X_2 - 1 \geq 0; f_2(X_1, X_2) = -X_1 + 2X_2 + 0,2 \geq 0; \\ f_3(X_1, X_2) &= 3X_1 - 2X_2 + 0,2 \geq 0; f_4(X_1, X_2) = -7X_1 - 6X_2 + 8,8 \geq 0; \\ G(\mathbf{X}) &= f_1(X_1, X_2) \wedge f_2(X_1, X_2) \wedge f_3(X_1, X_2) \wedge f_4(X_1, X_2). \end{aligned}$$

На основании (5) целевая функция будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} G_l(\mathbf{X}) &= 0,5(\varphi_{12}(X_1, X_2) + \varphi_{34}(X_1, X_2) - |\varphi_{12}(X_1, X_2) - \varphi_{34}(X_1, X_2)|); \\ \varphi_{12}(X_1, X_2) &= 0,5(\varphi_1(X_1, X_2) + \varphi_2(X_1, X_2) - |\varphi_1(X_1, X_2) - \varphi_2(X_1, X_2)|); \\ \varphi_{34}(X_1, X_2) &= 0,5(\varphi_3(X_1, X_2) + \varphi_4(X_1, X_2) - |\varphi_3(X_1, X_2) - \varphi_4(X_1, X_2)|); \\ \varphi_1(X_1, X_2) &= f_1(X_1, X_2)/\text{grad } f_1(X_1, X_2) - l = (X_1 + 4X_2 - 1)/\sqrt{17}; \\ \varphi_2(X_1, X_2) &= f_2(X_1, X_2)/\text{grad } f_2(X_1, X_2) - l = (-X_1 + 2X_2 + 0,2)/\sqrt{5}; \\ \varphi_3(X_1, X_2) &= f_3(X_1, X_2)/\text{grad } f_3(X_1, X_2) - l = (3X_1 - 2X_2 + 0,2)/\sqrt{13}; \\ \varphi_4(X_1, X_2) &= f_4(X_1, X_2)/\text{grad } f_4(X_1, X_2) - l = (-7X_1 - 6X_2 + 8,8)/\sqrt{85}. \end{aligned}$$

Оценка состояния ЭТС осуществляется следующим образом. Если вычисленное значение функции $G_l(\mathbf{X})$ положительное, то ЭТС находится в работоспособном состоянии, если отрицательное, то система неработоспособна. Если значения параметров \mathbf{X} выражены в относительных единицах, то вычисленное значение функции будет характеризовать относительное значение запаса работоспособности ЭТС, принадлежащее интервалу $[-1; 1]$.

Для определения запаса работоспособности метод предполагает последовательное зондирование пространства R^n диагностических параметров \mathbf{X} ЭТС. Направления зондирования определяются заданной исходной матрицей $M(\mathbf{X})$ координат первичных параметров, а величина отклонения опытных точек от исходного значения \mathbf{X}_i зависит от результатов предыдущих опытов. Матрица $M(\mathbf{X})$ включает $N = 2^n + 2n$ направлений поиска. Выбор числа N обусловлен тем, что при аналитическом описании гиперповерхностей $f_j(\mathbf{X})$, составляющих область работоспособности ЭТС, в большинстве случаев используются полиномы второго порядка, для построения которых используется N точек, составляющих ядро и звездные точки планов второго порядка. При этом точность аппроксимации области работоспособности будет соизмеримой с точностью поиска ве-

личины запаса работоспособности ЭТС. Предлагаемый алгоритм, реализующий данный метод, поясняется блок-схемой (рис. 2).

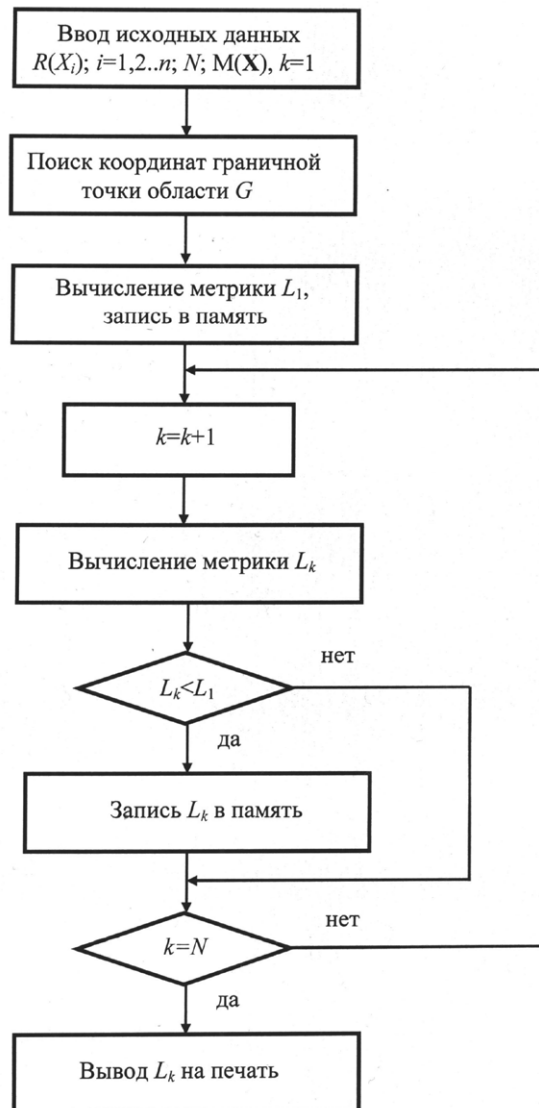


Рис. 2. Алгоритм адаптивного матричного поиска запаса работоспособности ЭТС

Вначале осуществляется поиск расстояния от точки с координатами X_i до границы области работоспособности в положительном направлении изменения координаты параметра X_1 при фиксированных значениях остальных параметров. В целях поиска предлагается использование метода «золотого сечения», имеющего наибольшую эффективность среди известных одномерных методов поиска экстремума унимодальных функций [19]. Полученное значение l_1 записывается в память компьютера. На последующих $N-1$ этапах поиска в качестве величины l_i , $i = 1, 2, \dots, N-1$ выбирается наименьшее из полученных значений l_i на предыдущих этапах поиска. Для оценки принадлежности исследуемой точки области работоспособности используется функция $G(X)$.

3. Оценка состояния ЭТС на основе метода сужающихся областей. Метод сужающихся областей разработан для решения задачи параметрического синтеза ЭТС по критерию запаса работоспособности [8], [20]. Основным достоинством рассматриваемого метода является принципиальная возможность поиска глобального оптимума при произвольной форме области работоспособности. Метод предусматривает последовательное сужение исходной области работоспособности до тех пор, пока она не выродится в точку. Для аналитического описания границы области работоспособности $G_1, G_2, \dots, G_k, \dots, G_s$, на каждом k -м шаге поиска используется математический

аппарат R -функций [7]. Указанным областям соответствуют запасы работоспособности ЭТС $l_1, l_2, \dots, l_k, \dots, l_s$ (в относительных единицах $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \dots, \lambda_s$). Например, при $S = 3$ для подобластей $G_1: \lambda_1 \in [0; l_1/l_0]$; $G_2: \lambda_2 \in [l_1/l_0; l_2/l_0]$; $G_3: \lambda_3 \in [l_2/l_0; 1]$. Для диагностирования состояния ЭТС достаточно по рассмотренному ранее критерию установить принадлежность вектора фактического состояния системы \mathbf{X} , определяемого координатами точки R_i той или иной области G_k .

В том случае, если информация о границах областей $G_1, G_2, \dots, G_k, \dots, G_s$ отсутствует и имеется только аналитическое описание области работоспособности, причем каждая составляющая ее гиперповерхность аппроксимирована классом гиперсфер [7], [21], предлагается использовать следующий алгоритм оценки состояния ЭТС.

На первом этапе определяется принадлежность или непринадлежность точки R_i области работоспособности. Для этого координаты исследуемой точки подставляются в формулу аналитического описания области работоспособности на основе логических R -функций. При этом, как отмечалось выше, положительный результат означает, что точка принадлежит области работоспособности и ЭТС находится в работоспособном состоянии. В противном случае ЭТС неработоспособна.

На втором этапе определяется гиперсфера, которая является ближайшей к точке R_i . В работе [21] доказано, что для этой цели достаточно сравнить численные значения R -функций, определяющие каждую гиперсферу, при подстановке в их выражения координат точки R_i . Меньшее значение определит гиперсферу, которая останется для дальнейшего анализа.

На третьем этапе определяется запас работоспособности l ЭТС. Легко видеть, что

$$l = |R - L|,$$

где R — радиус гиперсферы, оставленной для анализа; L — расстояние между точкой R_i и центром гиперсферы.

Рассмотренный алгоритм отличается малыми затратами времени и возможностью практической реализации при большом числе диагностических параметров. При $n > 10$ его достоинства часто являются решающими при выборе алгоритма контроля ЭТС.

В заключение рассмотрим алгоритм, позволяющий уточнить полученную с помощью рассмотренных ранее методов оценку запаса работоспособности ЭТС. При этом шаг поиска алгоритма, реализующего процедуру спиральной развертки, определяется необходимой погрешностью вычисления запаса работоспособности ЭТС.

Алгоритм спиральной развертки был разработан для решения задачи поиска первой граничной точки, принадлежащей области работоспособности при ее задании в виде множества граничных точек и изложен в работах [7], [22]. Геометрическая иллюстрация метода приведена на рис. 3.

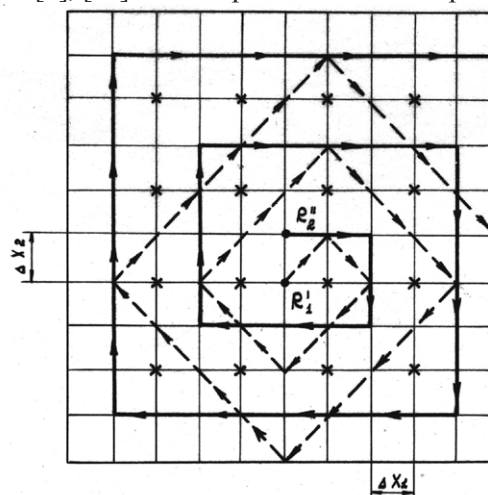


Рис. 3. Графическая реализация метода спиральной развертки:
 ——— показана спиральная развертка, осуществляемая с двойным шагом;
 - - - - спиральная развертка по диагонали;

* — точки, исключенные из рассмотрения на основании доказанной в работе [7] теоремы

Выбор точек для анализа принадлежности их области G осуществляется по спирали, начиная с точек R'_1 и R''_1 по следующему правилу:

$$R_v = 0,125\Delta X'_i \left[2v' + 1 + (-1)^{(v'-1)} \right] (-1)^{(v''-1)} \left[(-1)^{(v-1)} + 1 \right] + \\ + 0,125\Delta X_i \left[2v' + 1 + (-1)^{(v'-1)} \right] (-1)^{(v''-1)} \left[(-1)^v + 1 \right]; \\ i = 0,5(-1)^v + 1,5; v' = \mathbf{E}(0,5v + 0,5); v'' = \mathbf{E}(0,25v + 1); v = 1, 2, 3, \dots$$

Переход от координат $0X'_1X'_2$ к координатам $0X_1X_2$ выполняется по известным формулам [7], и для угла поворота между осями X'_i и X_i , равного $0,25\pi$, получим $X'_1 = (X_1 + X_2)/\sqrt{2}$ и $X'_2 = (X_1 - X_2)/\sqrt{2}$.

Выводы

1. Рассмотренные в работе методы и алгоритмы диагностирования состояния ЭТС позволяют с высокой достоверностью не только оценить работоспособность системы, но и определить запас ее работоспособности.
2. Эффективность алгоритмов была подтверждена тестовыми примерами и исследованиями реальных ЭТС, включая элементы автоматизированных электроприводов и системы их управления.
3. Достоинством алгоритмов является не только их низкая методическая погрешность, но и малые затраты времени на их программную и техническую реализацию, что позволяет диагностировать многопараметрические ЭТС в режиме онлайн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саушев А. В. Методы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 215 с.
2. Елтышев Д. К. Интеллектуализация процесса диагностики состояния электротехнического оборудования / Д. К. Елтышев // Информатика и системы управления. — 2015. — № 1 (43). — С. 72–82.
3. Саушев А. В. Морфологический анализ категории электротехническая система / А. В. Саушев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 193–201.
4. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1990.
5. ГОСТ 27.002–2009. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1990.
6. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 1990.
7. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.
8. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.
9. Саушев А. В. Идентификация и контроль состояния систем управления на основе информации о границе области работоспособности / А. В. Саушев // Материалы Международной науч.-техн. конференции «Автоматический контроль и автоматизация технологических процессов». — Минск: Белорусский гос. ун-т, 2012. — С. 151–155.
10. Саушев А. В. Метод оценки состояния электротехнических систем на стадии эксплуатации / А. В. Саушев // Материалы XI Международной науч.-практ. конференции. «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий». — М.: НИУ ВШЭ, 2014. — С. 489–491.
11. Катueva Я. В. Алгоритмы анализа области работоспособности, заданной в матричной форме / Я. В. Катueva, Д. А. Назаров // Информатика и системы управления. — 2005. — № 2 (10). — С. 118–128.
12. Абрамов О. В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. — 2011. — № 2. — С. 4–15.

13. Саушев А. В. Планирование эксперимента в электротехнике / А. В. Саушев. — СПб.: СПб. гос. ун-т водных коммуникаций, 2012. — 272 с.
14. Саушев А. В. Аналитический метод назначения допусков на параметры динамических систем / А. В. Саушев // Информатика и системы управления. — 2012. — № 3. — С. 120–131.
15. Алексеев А. А. Идентификация и диагностика систем / А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопапов. — М.: Академия, 2009. — 352 с.
16. Нивин А. Е. Синтез ортогональных фильтров при статистической идентификации динамических систем / А. Е. Нивин, А. В. Саушев, В. А. Шошмин // Приборостроение. — 2013. — № 10. — С. 5–11.
17. Пат. SU 1354163 A1 СССР, G 05 B 23/02. Устройство для диагностирования технического объекта / В. А. Воловиков, И. А. Краснов, А. В. Саушев, Н. В. Широков. — № 1354163; Заявл. 31.03.1986; Опубл. 23.11.1987. Бюл. № 43. — 5 с.
18. Саушев А. В. Параметрический синтез технических систем на основе линейной аппроксимации области работоспособности / А. В. Саушев // Автометрия. — 2013. — Т. 49. — № 1. — С. 61–67.
19. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2 т. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. — М.: Мир, 1986. — Т. 1. — 351 с.
20. Саушев А. В. Метод и алгоритмы параметрического синтеза электротехнических систем по критерию запаса работоспособности / А. В. Саушев // Информационные технологии. — 2012. — № 12. — С. 24–29.
21. Саушев А. В. Алгоритмы синтеза номиналов и допусков многопараметрических систем / А. В. Саушев. // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2015. — № 3. — С. 65–73.
22. Саушев А. В. Комплексный подход к проблеме повышения параметрической надежности систем управления судовых электростанций / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Сб. науч. тр. НТО им. акад. А. Н. Крылова «Вопросы обеспечения надежности и диагностирования судовых технических средств». — 1988. — № 454. — С. 18–23.

DIAGNOSING OF THE CONDITION OF ELECTROTECHNICAL SYSTEMS IN SPACE OF PARAMETERS OF THEIR ELEMENTS

One of the most important problems of technical diagnostics is definition of a condition of dynamic system in the course of its operation. In article methods of the solution of this task in relation to a class of electrotechnical systems are considered. Thus as diagnostic parameters the internal parameters of system defining a condition of its accessories of elements are considered. It is shown that information on working capacity area border is necessary for an assessment of a condition of system and definition of its stock of working capacity. In work the working capacity area task in the form of a set of boundary points, and also in the form of the analytical description of its border is considered. Rules of recognition of accessory or not accessory of a vector of an actual state of system of area of working capacity which are defined by a form of its task are received. Algorithms of calculation of a stock of operability of electrotechnical system are considered. Scopes of each algorithm which are caused by a working capacity area task form, its look and dimension of space of diagnostic parameters are defined. The developed methods and algorithms are approved on test examples and real electrotechnical systems.

Keywords: electrotechnical system, working capacity area, control of a state, working capacity stock, diagnostic parameters.

REFERENCES

1. Saushev, A. V. *Metody upravlenija sostojaniem jelektrotehnicheskikh sistem obektov vodnogo transporta*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2014.
2. Eltyshv, D. K. "Intellectualization of diagnostics of electric machinery." *Information Science and Control Systems* 1(43) (2015): 72–82.
3. Saushev, A. V. "Morphological analysis of category «Electrotechnical system»." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 193–201.
4. Russian Federation. GOST 27.002–89. Nadezhnost v tehnikе. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija. M.: Izd-vo standartov, 1990.
5. Russian Federation. GOST 27.002–2009. Nadezhnost v tehnikе. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija. M.: Izd-vo standartov, 1990.

6. Russian Federation. GOST 20911–89. Tehnicheskaja diagnostika. Terminy i opredelenija. M.: Standartinform, 1990.
7. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti jelektrotehnicheskikh sistem*. SPb.: Politehnika, 2013.
8. Saushev, A. V. *Parametricheskij sintez jelektrotehnicheskikh ustrojstv i sistem*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2013.
9. Saushev, A. V. “Identifikacija i kontrol sostojanija sistem upravlenija na osnove informacii o granice oblasti rabotosposobnosti.” *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Avtomaticheskij kontrol i avtomatizacija tehnologicheskikh processov»*. Minsk: Belorusskij gos. teh. un-t, 2012: 151–155.
10. Saushev, A. V. “Metod of an assessment of a condition of electrotechnical systems at an operation stage.” *Materials of XI International Scientific and Practical Conference “Innovations based on Information and Communication Technologies”*. M.: NIU VShJe, 2014: 489–491.
11. Katuyeva, Ya. V., and D. A. Nazarov. “Analysis algorithms of work field given in matrix form.” *Information Science and Control Systems* 2(10) (2005): 118–128.
12. Abramov, O. V. “Monitoring and forecasting of technical condition of systems of responsible appointment.” *Information Science and Control Systems’ 2* (2011): 4–15.
13. Saushev, A. V. *Planirovanie jeksperimenta v jelektrotehnike*. SPb.: S.-Peterb. gos. un-t vodnyh kommunikacij, 2012.
14. Saushev, A.V. “Analytical method of tolerancing for parameters of dynamic systems.” *Information Science and Control Systems’ 3* (2012): 120–131.
15. Alekseev, A. A., Ju. A. Korablev, and M. Ju. Shestopalov. *Identifikacija i diagnostika sistem*. M.: Akademiya, 2009.
16. Nivin, A. E., A. V. Saushev, and V. A. Shoshmin. “Sintez ortogonalnyh filtrov pri statisticheskoj identifikacii dinamicheskikh sistem.” *Priborostroenie* 10 (2013): 5–11.
17. Volovikov V. A., I. A. Krasnov, A. V. Saushev, and N. V. Shirokov. *Ustrojstvo dlja diagnostirovanija tehnicheskogo obekta*. Patent 1354163. Publ. 23 Nov. 1987.
18. Saushev, A. V. “Parametric synthesis of technical systems based on the linear approximation of the operational capability range.” *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 49.1 (2013): 51–56.
19. Reklejtis, G., A. Rejvindran, and K. Rjagsdel. *Optimizacija v tehnike. Tom 1*. M.: Mir, 1986.
20. Saushev, A. V. Metod and algorithms of parametrical synthesis of electrotechnical systems by criterion of a stock of working capacity *Information technologies* 12 (2012): 24–29.
21. Saushev, A. V. “Synthesis algorithms of face values and admissions of multiple parameter systems.” *Information technologies and computing systems* 3 (2015): 65–73.
22. Saushev, A. V., and N. V. Shirokov. “Kompleksnyj podhod k probleme povyshenija parametricheskoy nadezhnosti sistem upravlenija sudovyh jelektrostancij.” *Sbornik nauchnyh trudov NTO im. akad. A. N. Krylova «Voprosy obespechenija nadezhnosti i diagnostirovanija sudovyh tehnicheskikh sredstv»* 454 (1988): 18–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Широков Николай Викторович —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
shirokovn@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev Aleksandr Vasil’evich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Shirokov Nikolaj Viktorovich — PhD.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
shirokovn@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2016 г.

МЕТОД АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОРТУ

Статья посвящена проблеме повышения точности определения расчетных нагрузок электрических сетей речных и морских портов. В основе расчетов лежит выявление потребности в электроэнергии, которая, с одной стороны, преобразуется в параметры электроустановок, а, с другой — в показатели энергоёмкости производства. В предложенном методе производительности различных причалов связываются с удельными расходами электроэнергии соответствующих кранов, работающих на данном участке. Доказано, что разнообразная специализация причалов даже одного рода груза (например, навалочного) влияет на суммарное потребление порта. В данном расчете порт рассматривался как система массового обслуживания, при этом использовалась модель системы с очередью, что позволило определить эффективную структуру порта, число причалов и резервы пропускной способности. Построенные графики показали, что расхождение между теоретическим и статистическим распределениями минимально, что позволяет говорить об эффективном использовании метода определения расчетной максимальной нагрузки для порта, основанного на теории массового обслуживания.

Ключевые слова: перегрузочные процессы, электрохозяйство, вероятность использования перегрузочных машин, электропотребление, максимальная мощность, установленная мощность, электрическая нагрузка.

III ОРТ как производственный объект представляет собой совокупность причалов, специализированных по определенному роду груза при соответствующих механовооруженности, организации и технологии перегрузочных работ [1], [2]. Выполненный анализ указанных обстоятельств позволил установить характеристики типовых перегрузочных процессов в соответствии с технологическими нормативами для производства погрузочно-разгрузочных работ. Пример этого анализа приведен в табл. 1, в которой представленные величины означают следующее: техническая производительность кранов (причала) — H_T , среднечасовая (эксплуатационная) производительность причала за время грузовых работ (t_T) — $H_{ч}$, среднеквадратичное отклонение производительности — $\Delta_{ч}$, сменная производительность причала — $H_{см}$, время занятости причала судном — $t_{зан}$.

Полученные относительные характеристики $H_T/H_{ч}$ и $t_T/t_{зан}$ являются также и характеристиками процесса потребления электроэнергии. Связав производительности различных причалов с удельными расходами электроэнергии при переработке различных грузов, можно в результате определить показатели режима потребления электроэнергии перегрузочными машинами и причала как производственной единицы. Однако разнообразная специализация причалов даже одного рода груза (например, навалочного) требует количественного анализа их взаимодействия и влияния на суммарное потребление порта [3], [4].

Таблица 1

**Характеристики перегрузочных процессов на причале навалочных грузов
 (порт выгрузки)**

Груз	Количество груза в судне	Механизация	Вариант	H_T , т/ч	$H_{ч}$, т/ч	$\Delta_{ч}$, т/ч	$H_{см}$, т/см	$t_{зан}$, ч	$H_T/H_{ч}$	$t_T/t_{зан}$
Песок, песчано-гравийная смесь	3750	2×10 т	Судно-вагон	500	426	219	3280	12,5	0,85	0,7
		2×10 т	Судно-склад	588	507	258	3900	10,8	0,86	0,68

Таблица 1
 (Окончание)

	1800	2×10 т	Судно-вагон	495	428	225	3300	9,3	0,86	0,45
		2×10 т	Судно-склад	600	514	261	3960	8,4	0,85	0,42
	1000	2×10 т	Судно-вагон	500	465	232	3580	5,5	0,93	0,39
		2×10 т	Судно-склад	600	555	267	4273	5,2	0,92	0,35
Гравий, щебень	3000	2×10 т	Судно-вагон	380	314	169	2420	15,9	0,83	0,6
		2×10 т	Судно-склад	450	368	201	2830	14,3	0,82	0,57
	2000	2×10 т	Судно-вагон	342	260	172	2000	12,5	0,76	0,62
		2×10 т	Судно-склад	405	308	174	2370	11	0,76	0,59
Руда	2000	2×10 т	Судно-вагон	455	345	192	2660	10,3	0,76	0,56
		2×10 т	Судно-склад	535	402	226	3090	9,3	0,75	0,53
	2800	2×10 т	Судно-вагон	450	370	188	2850	14,5	0,83	0,52
		2×10 т	Судно-склад	540	440	215	3390	13,0	0,81	0,48

Это влияние может быть выяснено на основе результатов исследований перегрузочного процесса морских и речных портов [5], [6], которые рассматриваются как система массового обслуживания, в которой требованиями являются суда или группы вагонов, поступающих на обработку. Грузопоток в данном случае является простейшим потоком, т. е. число заявок на обслуживание за любой фиксированный интервал времени распределено по закону Пуассона:

$$V_m = \frac{e^{-\lambda} \lambda^m}{m!}, \quad (1)$$

где $m! = 0, 1 \dots m$ — число заявок на обслуживание; V_m — вероятность наличия в системе m заявок; λ — плотность судопотока обслуживания, 1/сут.

Порт как система массового обслуживания состоит из обслуживающих элементов, которыми являются причалы. Для успешного функционирования системы необходимо, чтобы число причалов было не меньше приведенной плотности судопотока [3], т. е.

$$r \leq \rho = \frac{\lambda}{v}, \quad (2)$$

где $v = \frac{24}{t_{\text{обр}}}$ — средняя интенсивность обработки судов на одном причале при среднем времени обработки судна $t_{\text{обр}}$ (ч; 1/сут).

С другой стороны, минимально необходимое число причалов определяется по формуле

$$r_0 = \frac{q}{\Pi_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где $q = \frac{Q_r}{T_s}$ — среднесуточный грузооборот порта по данному роду груза, т/сут; Q_r — соответствующий навигационный грузооборот, т; T_s — длительность навигации, сут.; $\Pi_{\text{пр}}$ — суточная пропускная способность причала по данному роду груза (т/сут.), определяемая по формуле

$$Q_{\text{пр}} = kSt_{\text{оп}}H_{\text{т}}, \quad (4)$$

где k — количество кранов на причале; S — число смен в сутки; $t_{\text{оп}}$ — оперативное время работы за смену, ч; $H_{\text{т}}$ — средняя техническая часовая производительность крана, т/ч.

Для обеспечения оптимальной организации перегрузочного процесса, соответствующей минимальным приведенным затратам на флот и порты, окончательное решение по оборудованию причалов и их количеству должно определяться величиной использования пропускной способности причала τ .

$$\tau = \frac{q}{r\Pi_{\text{пр}}} = \frac{\lambda}{rv}. \quad (5)$$

Иначе говоря, величина τ определяется отклонением минимально необходимого числа причалов r_0 к действительному числу причалов r .

Установлено [7], [8], что для эффективной эксплуатации большегрузных теплоходов грузоподъемностью 2000 – 5000 т необходимо обеспечить соотношение грузооборота и пропускной способности в следующих размерах:

- по лесным причалам 1 : 3;
- по причалам навалочных грузов 1 : 5.

Если при данном грузообороте $\tau > \tau_{\text{опт}}$, то увеличивают или пропускную способность причала, или количество причалов, или то и другое [9].

В связи с изложенным можно заключить, что количество, грузоподъемность и использование кранов на причале и, следовательно, величина установленной мощности определяются при заданном грузообороте величиной τ . Тогда, выражая среднюю часовую техническую производительность крана (т/ч),

$$H = G_{\text{н}} k_{\text{гр}} m, \quad (6)$$

где m — среднее число циклов крана в час; $k_{\text{гр}}$ — коэффициент использования номинальной грузоподъемности, определяющий вес поднимаемого груза.

Используя выражение (6) и (3), можно получить

$$kG_{\text{н}} = \frac{q}{S \cdot t_{\text{оп}} \cdot k_{\text{гр}} \cdot m \cdot \tau \cdot r}. \quad (7)$$

Введенная ранее величина $P_{\text{уд}}$, которая связывает номинальные грузоподъемности кранов с их установленной мощностью, позволяет записать $P_{\text{у}} = P_{\text{уд}} kG_{\text{н}}$ (установленная мощность) и в итоге получить искомую зависимость

$$P_{\text{у}} = \frac{P_{\text{уд}} \cdot q}{S \cdot t_{\text{оп}} \cdot k_{\text{гр}} \cdot m \cdot \tau \cdot r}. \quad (8)$$

При умножении левой и правой части последнего выражения на r получается выражение для определения $P_{\text{у}}$ при любом количестве причалов

$$P_{\text{уr}} = \frac{P_{\text{уд}} \cdot q}{S \cdot t_{\text{оп}} \cdot k_{\text{гр}} \cdot m \cdot \tau}. \quad (9)$$

Поскольку величины s , $t_{\text{оп}}$, $k_{\text{гр}}$ и m являются нормативными, то можно записать

$$P_{\text{уr}} = \frac{\vartheta \cdot q}{\tau}, \quad (10)$$

где $J = \frac{P_{уд} \cdot q}{S \cdot t_{оп} \cdot k_{гп} \cdot m}$ — определяет технологическое использование крана на определенном роде груза.

Выражение P_{yr} (10) дает величину суммарной установленной мощности. По этой величине можно определить число кранов соответствующей грузоподъемности, ориентируясь на ближайшую большую суммарную мощность. Величина ϑ для данного рода груза получилась равной 0,041. Учитывая, что средние часовые технические производительности на навалочных, лесных и штучных грузах относятся как 1:0,41:0,25 [1], [8], то для лесных грузов можно записать — 0,098, для штучных — 0,164.

Переходя к режиму потребления электроэнергии перегрузочными машинами, следует подчеркнуть, что последний связан с режимом прибытия объектов для грузовой обработки, так как периоды работы машин определяются периодом нахождения указанных объектов под обработкой. Частота прибытия объектов для грузовой обработки может быть выражена

$$\lambda_c = \frac{q}{Q_3}, \quad (11)$$

где Q_3 — эксплуатационная загрузка судна грузом, т.

При рассмотрении структуры грузопотока на причалы однородного груза наибольшую трудность представляет определение λ_i по каждому типу судна или выявление соответствия между λ_i и Q_{3i} . Поэтому для анализа системы можно воспользоваться приведенной плотностью судопотока ρ по выражению (2). В предельном случае $\rho = r$. Очевидно, что в этом случае потребляемая мощность будет максимальной.

Применяя принятую ранее модель простейшего потока к группе причалов одного рода грузов, можно воспользоваться для определения вероятностей состояний системы формулой Эрланга

$$V_m = \frac{\frac{p^m}{m!}}{\sum_1^n \frac{p^m}{m!}}. \quad (12)$$

При наличии в порту r причалов данного рода груза вероятности V_m при изменении m от 0 до r составляют полную сумму событий, т. е.

$$\sum_0^r V_m = 1.$$

Вероятность занятости причалов есть вероятность использования перегрузочных машин на грузовых работах. Тогда, если каждый из причалов создает среднюю нагрузку P_c , то среднесменная нагрузка группы причалов определится как математическое ожидание

$$P_{\Sigma см} = V_{r0} \sum_1^r P_{ci} + \frac{r-1}{r} V_{(r-1)} \sum_1^r P_{ci} + \dots + \frac{1}{r} V_1 \sum_1^r P_{ci}. \quad (13)$$

Выражая $V_m = \frac{p^m}{m! V_0}$, где V_0 — вероятность отсутствия грузовой работы на данной группе причалов, можно записать

$$P_{\Sigma см} = V_0 \sum_1^r P_{ci} \left[\frac{p^r}{r!} + \frac{(r-1)}{r} \cdot \frac{p^{(r-1)}}{(r-1)!} + \dots + \frac{1}{r} p \right], \quad (14)$$

или $P_{\Sigma см} = \gamma \sum_1^r P_{cmi}$.

Рассчитанные по последней формуле V_i и γ при числе причалов от 1 до 4 представлены в табл. 2. Полученные значения γ являются максимальными, так как принят предельный случай

$p = r$ и, кроме того, не учитывается степень использования пропускной способности, вывод кранов для аварийного или текущего ремонта, возможная неравномерность грузопотока.

Таблица 2

Вероятности состояний группы причалов одного рода груза

V_m	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
1	0,5	0,5	–	–	–	0,5
2	0,2	0,4	0,4	–	–	0,6
3	0,076	0,23	0,347	0,347	–	0,655
4	0,029	0,11	0,233	0,31	0,31	0,685

Практическая проверка этих результатов была проведена по данным 1-го района Санкт-Петербургского морского порта за навигацию 2014 г. Этот район представляет собой семь грузовых причалов, оснащенных 23 однотипными порталными кранами грузоподъемностью до 40 т и перерабатывающих цветной и черной металлы по одному и тому же варианту. Такие особенности дали возможность основываться на производительности кранов, а не на потребляемой мощности, так как удельные нормы расхода, связывающие эти величины для всех кранов одинаковы. На рис. 1 представлены распределения числа судов, прибывающих на обработку за сутки (рис. 1, а), и времени обработки судов на причалах района (рис. 1, б). Согласие между теоретическим законом Пуассона и статистическим распределением числа судов проверялось по критерию χ^2 с применением правила Романовского:

$$\frac{\chi^2 - \nu}{\nu} = \frac{17,1 - 8}{4} = 2,27 < 3.$$

Как видно, расхождение между теоретическим и статистическим распределениями можно считать случайным. Результаты статистической обработки отчетных данных сведены табл. 3.

Таблица 3

Параметры грузопотока 1-го района Санкт-Петербургского морского порта

	$q_{\text{мес}}$	$q_{\text{см}}$	$q_{\text{мес}}$	λ	ν	ρ	$Y_{\text{ст}}$	Y_p
Май	72603	756	95	2,53	1,81	1,4	0,262	0,5
Июнь	112061	1240	156	3,43	2	1,71	0,433	0,55
Июль	130631	1420	175	3,84	2,25	1,71	0,487	0,55
Август	135227	1456	182	3,9	2,13	1,83	0,507	0,575
Сентябрь	135295	1506	188	3,7	2,15	1,72	0,522	0,552
Октябрь	132969	1430	178	3,45	1,85	1,87	0,496	0,585
Ноябрь	79675	1106	138	2,28	1,42	1,6	0,384	0,535
Навигация	–	1273	159	1,59	1,96	1,84	0,443	0,575

В таблице значения величины Y_p рассчитаны по формулам (13) и (14), а величина $Y_{\text{ст}}$ представляет собой статистическое отношение действительной сменной пропускной способности причалов и нормативной, равной 2880 т.

Пусть теперь порт имеет m участков, специализированных по определенному роду груза. Каждый участок содержит n_i причалов, где $i = 1, \dots, m$. На участки поступают грузопотоки, которые являются независимыми, их интенсивность равна λ_i , а в соответствии с принятой системой механизации и технологии обработки судов — интенсивность обработки на причалах каждого участка равна ν_i . Тогда каждый из участков может находиться в некотором состоянии j_i , которое харак-

теризуется количеством судов, находящихся под обработкой, или иначе количеством занятых на данном участке причалов. Данную систему причалов можно рассматривать как многоканальную систему обслуживания с отказами [10]. Хотя в общей теории обоснования порта как системы массового обслуживания используется модель системы с очередью [11], [12] и это позволяет определить эффективную структуру, в случае оценки энергоемкости требование, находящееся в очереди, теряется для обеспечения электроэнергии в данный момент времени и поэтому предложенную модель можно считать оправданной.

Тогда вероятности состояний V_{ij} , $j = 1, \dots, n_i$ могут быть определены из системы уравнений Колмогорова [13].

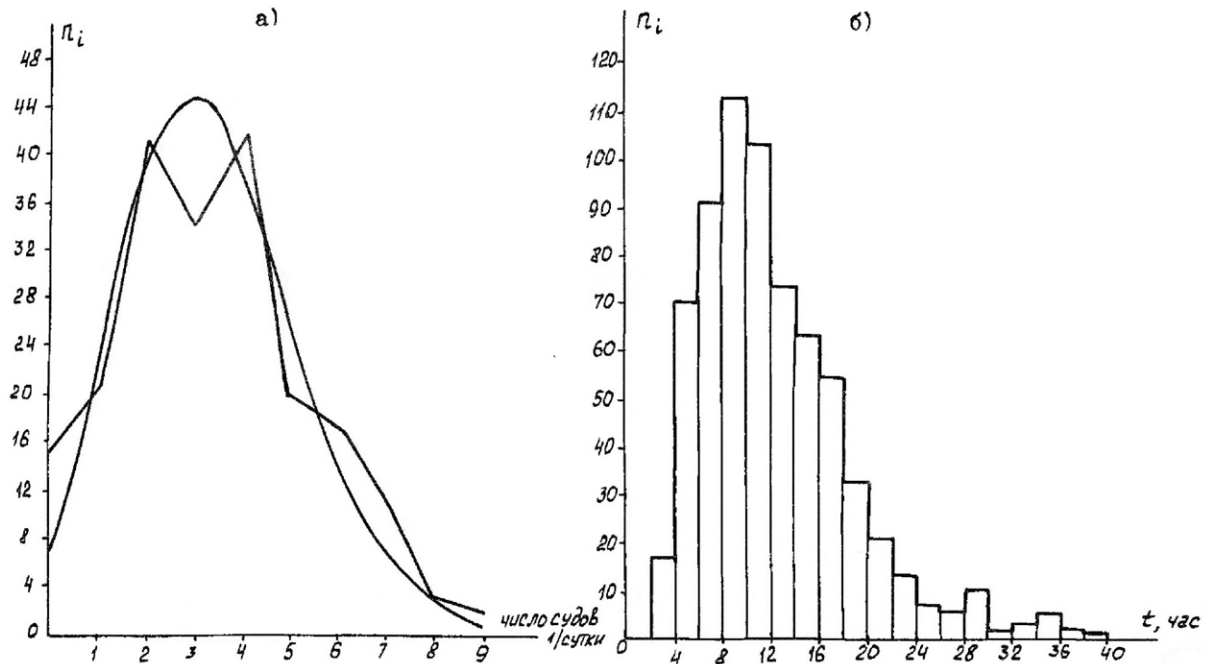


Рис. 1. Распределение числа судов (а) и времени обработки (б) на причалах Первого грузового района порта Санкт-Петербург

$$\begin{aligned}
 DU_{i,0} &= -\lambda_i V_{i,0} + v_i V_{i,1}; \\
 DU_{i,1} &= \lambda_i V_{i,0} - (\lambda_i + v_i) V_{i,1} + 2v_i V_{i,2}; \\
 &\dots \\
 DU_{i,k} &= \lambda_i V_{i,k-1} - (\lambda_i + kv_i) V_{i,k} + (k+1)v_i V_{i,k+1}; \\
 &\dots \\
 DU_{i,n_i} &= \lambda_i V_{i,n_i-1} - n_i v_i V_{i,n_i},
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где $D = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования.

Уравнение (15) в матричной форме примет вид $D[V_i] = [A_i][V_i]$, где $[V_i]$ — вектор вероятностей состояний i -го участка, имеет вид

$$[A_i] = \begin{bmatrix} -\lambda_i & v_i & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_i & -(\lambda_i + 3v_i) & 2v_i & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_i \dots & -(\lambda_i + 2v_i) & 3v_i & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_i - n_i \cdot v_i \end{bmatrix}
 \tag{16}$$

Поскольку вероятности состояний связаны соотношением $V_{i,0} = 1 - V_{i,1} - \dots - V_{i,n}$, при подстановке этого равенства в (15) оно примет вид (в матричной форме)

$$D[\hat{V}_i] = [\hat{A}_i][\hat{V}_i] + [B_i], \quad (17)$$

где $[\hat{V}_i]$ — транспонированный вектор вероятностей состояний.

Следовательно, итоговое решение можно представить в виде

$$[\hat{V}_i] = e^{[\hat{A}_i]t} \cdot ([\hat{V}_i(0)] - [\hat{V}_i^*]) + [\hat{V}_i^*]. \quad (18)$$

Тогда, если на участке n_i одинаковых причалов с потребляемой мощностью X_i , то в j -м состоянии потребляемая мощность будет равна jX_i [13].

Состояние порта определяется состоянием его участков. Состояние порта $Z_1 = \{j_1, \dots, j_m\}$ означает занятость на первом участке j_1 причалов, на втором — j_2 и т. д. Число состояний $i = 1, 2, \dots, L$. Мощность, потребляемая портом, определяется как сумма мощностей участков. Очевидно максимальная мощность равна

$$X_{\max} = n_1 X_1 + \dots + n_m X_m. \quad (19)$$

В соответствии с вероятностными закономерностями, обусловленными интенсивностями подхода судов и их обработки, состояния порта будут меняться, т. е. мощность $X(t)$ будет некоторой случайной функцией времени

$$X(t) = X_1(t) + \dots + X_m(t), \quad (20)$$

математическое ожидание которой равно

$$M\{X(t)\} = M\{X_1(t)\} + \dots + M\{X_m(t)\} = M(X_1) + \dots + M(X_m). \quad (21)$$

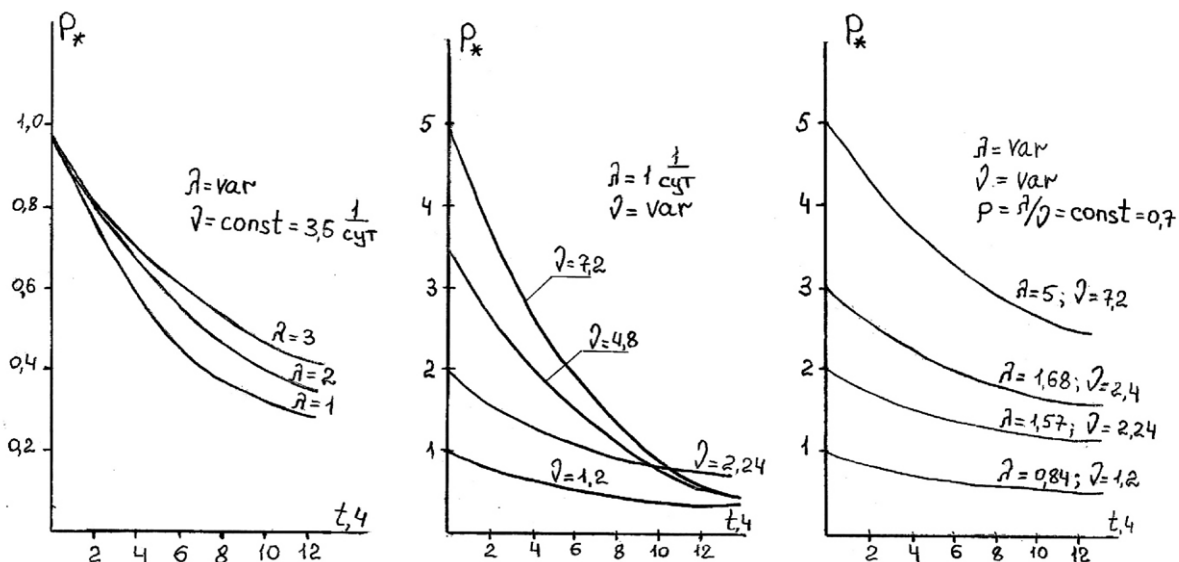


Рис. 2. Исследование зависимости максимальной нагрузки от параметров судопотока и пропускной способности причалов

При $t = 0$ мощность, потребляемая портом, максимальна, а при $t = \infty$ равна средней мощности $M\{X(\infty)\} = j_1^* X_1 + \dots + j_m^* X_m$.

Вид функции $M\{X(t)\}$ аналогичен виду функции $M(X_i)$. Таким образом, появляется возможность рассчитать основные параметры режима электропотребления по исходным данным, характеризующим технологию погрузочно-разгрузочных работ и организацию транспортного процес-

са [2]. В качестве основных параметров электропотребления можно выделить максимальную нагрузку X_{\max} , нагрузку установившегося режима X_{∞} и закономерность затухания максимума вида

$$X_i = X_{\infty} + (X_{\max} - X_{\infty}) e^{(-at_i)}. \quad (22)$$

Выделенные параметры зависят от рода грузов, технологии переработки и характеристик транспортного процесса. Выполненные расчеты позволяют выяснить характер этих зависимостей (рис. 2). Поскольку зависимости являются многомерными, задача получения их в виде уравнений не ставилась, так как они для каждого конкретного случая выясняются при расчете на ЭВМ.

Выводы

1. Параметры режимов потребления перегрузочных машин могут быть получены моделированием на ЭВМ с использованием свойств электроприводов основных механизмов и нормативов технологии. Получаемые при этом графики достаточно точно отражают реальные графики нагрузок, а получаемая при этом информация значительно обширнее, чем можно получить из постановки натуральных экспериментов.

2. Использование результатов исследований транспортного процесса на перевозках грузов, построенных на теории массового обслуживания, подтвердили, что грузопоток в портах удовлетворительно описывается моделью простейшего потока, а число заявок (судов) на обслуживание за любой фиксированный интервал времени распределено по закону Пуассона.

3. Разработанная на основе теории массового обслуживания методика расчета обобщенных нагрузок причалов, района и порта в целом позволяет на системной основе аналитически рассчитывать максимальные нагрузки, их вероятности и получать расчетные модели графиков групповой нагрузки, адекватно отражающие процессы электропотребления, порождаемые транспортным процессом.

4. Полученные результаты стимулировали дальнейшие исследования: установление частоты максимумов и их единичной длительности, и, в конечном итоге, получение аналитической модели групповых графиков электрической нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормативы времени на погрузочно-разгрузочные работы, выполняемые в речных портах и пристанях. — М.: Транспорт, 1980. — 128 с.
2. Падня В. А. Погрузочно-разгрузочные машины: справочник / В. А. Падня. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1981. — 448 с.
3. Шошмин В. А. Развитие методов проектирования и эксплуатационного анализа электрооборудования: отчет о НИР / В. А. Шошмин. — СПб.: ФГБОУ ВПО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова», 2013. — 69 с.
4. Понятовский В. В. Основные технологические требования к морским портам / В. В. Понятовский. — М.: ТРАНСЛИТ, 2014. — 288 с.
5. Александров А. Э. Расчет и оптимизация транспортных систем с использованием моделей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. Э. Александров. — Екатеринбург, 2008. — 50 с.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерное приложение / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — М.: КНОРУС, 2010. — 480 с.
7. Ирхин А. П. Управление флотом и портами: учебник для вузов / под ред. А. П. Ирхина / А. П. Ирхин, В. С. Суворов, В. К. Щепетов. — М.: Транспорт, 1986. — 392 с.
8. Казаков А. П. Технология и организация перегрузочных работ на речном транспорте: учебник для вузов / А. П. Казаков. — 3-е изд., перераб и доп. — М.: Транспорт, 1984. — 416 с.
9. Кулаженко В. Ф. Технология и механизация перегрузочных работ в портах и на транспортных терминалах: справ. материалы и нормативы для выполнения курсового проекта / В. Ф. Кулаженко, Ю. Г. Ежов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 57 с.

10. Русинов И. А. Моделирование управляемых многоканальных систем массового обслуживания / И. А. Русинов // Программные продукты и системы. — 2008. — № 2. — С. 56–57.
11. Фокин Ю. А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения / Ю. А. Фокин. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 238 с.
12. Шошмин В. А. Теория и методы анализа электропотребления перегрузочных процессов и оптимизация электроснабжения портов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / В. А. Шошмин. — Л.: Изд-во Лен. гос. мор. техн. ун-та, 1991. — 39 с.
13. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. — М.: Наука, 1988. — 208 с.

ANALYSIS METHOD OF POWER CONSUMPTION TRANSSHIPMENT PROCESSES IN PORT

The article is devoted to improve the accuracy of the calculated load electric networks of river and sea ports. The calculation is based on the detection of energy needs, which on the one hand, is converted into electrical parameters, and on the other — in the production of energy intensity. In the proposed method, the performance of various piers associated with specific energy consumption corresponding crane working at the site. It is proved that a diverse specialization of berths even one type of cargo (eg bulk) impact on the total consumption of the port. In this calculation, the port was seen as a queuing system in this model system was used to queue it possible to determine the effective port structure, the number of berths and capacity reserves. Charting revealed that the discrepancy between the theoretical and the statistical distribution of the minimum that allows to speak about the effective use of the method for determining the estimated maximum load for the port based on queuing theory.

Keywords: reloading processes, the electrical equipment, the probability of the use of transfer machines, power consumption, maximum power, installed capacity, the electrical load.

REFERENCES

1. Normativy vremeni na pogruzno-razgruzochnye raboty, vypolnjaemye v rechnyh portah i pristanjah. М.: Transport, 1980.
2. Padnya, V. A. *Pogruzochno-razgruzochnye mashiny: Spravochnik*. М.: Transport, 1981.
3. Shoshmin, V. A. *Razvitie metodov proektirovaniya i jekspluacionnogo analiza jelektrooborudovaniya: otchet o NIR*. SPb.: FGBOU VPO “GUMRF im. admirala S. O. Makarova”, 2013.
4. Ponyatovsky, V. V. *Osnovnye tehnologicheskie trebovaniya k morskim portam*. М.: TRANSLIT, 2014.
5. Aleksandrov, A. Je. Raschet i optimizacija transportnyh sistem s ispolzovaniem modelej: Abstract of Dr. diss. (Tech.). Ekaterinburg, 2008.
6. Ventcel, E. S., and L. A. Ovcharov. *Teorija verojatnostej i ee inzhenernoe prilozhenie*. М.: KNORUS, 2010.
7. Irhin, A. P., V. S. Suvorov, and V. K. Shhepetov. *Upravlenie flotom i portami: Uchebnik dlja vuzov*. М.: Transport, 1986.
8. Kazakov, A. P. *Tehnologija i organizacija peregruzochnyh rabot na rechnom transporte: Uchebnik dlja vuzov*. М.: Transport, 1984.
9. Kulazhenko, V. F., and Ju. G. Ezhov. *Tehnologija i mehanizacija peregruzochnyh rabot v portah i na transportnyh terminalah: spravocnyje materialy i normativy dlja vypolnenija kursovogo proekta*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2014.
10. Rusinov, I. A. “Modelirovanie upravljaemyh mnogokanalnyh sistem massovogo obsluzhivaniya.” *Programmnye produkty i sistemy* 2 (2008): 56–57.
11. Fokin, Ju. A. *Verojatnostno-statisticheskie metody v raschetah sistem jelektrosnabzhenija*. М.: Jenergoatomizdat, 1985.
12. Shoshmin, V. A. *Teorija i metody analiza jelektropotreblenija peregruzochnyh processov i optimizacija jelektrosnabzhenija portov: Abstract of Dr. diss. (Tech.)*. L.: Len. gos. mor. tehn. un-t, 1991.
13. Ventcel, E. S. *Issledovanie operacij. Zadachi, principy, metodologija*. М.: Nauka, 1988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Толокнова Ольга Михайловна — старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
olga_toloknova@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Шошмин Владимир Александрович — доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
pawlick@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Toloknova Olga Mihajlovna — Senior Lecturer.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
olga_toloknova@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Shoshmin Vladimir Aleksandrovich — Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
pawlick@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2016 г.

УДК 621.396

**Ю. М. Устинов,
А. В. Припотнюк,
А. И. Кулинич**

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ
СУДОВЫХ СРЕДСТВ СВЯЗИ И СПАСАНИЯ**

В статье рассмотрены вопросы оснащения судов новыми современными средствами связи и спасания в зависимости от района плавания судна. Показаны достоинства и недостатки современных конвенционных систем и дополнительного оборудования. В частности, показано, что современное оборудование имеет проблему надежной и оперативной связи на высоких широтах. Показаны пути решения данной проблемы как с помощью спутников на наклонных орбитах, так и использованием глобальной сети спутниковой связи ИРИДИУМ, АЙКО, ОДИССЕЙ. Приводятся рабочие зоны и параметры работы спутников на высокоэллиптических орбитах МОЛНИЯ, ТУНДРА, предлагаемых для работы на северных акваториях. В статье приводятся и изменения в аппаратуре спасательных средств, представлены материалы по модернизированному бую АИС-АРБ. На основании приведенных материалов делается вывод о необходимости модернизации комплекса судовой аппаратуры.

Ключевые слова: средства связи, цифровые методы, геосинхронных высокоэллиптических орбитах, ГМССБ, АИС-АРБ.

**Типовые составы судовых средств связи и спасания
для различных морских районов плавания**

Современные средства связи морской подвижной службы (МПС) и морской подвижной спутниковой службы (МПСС) обеспечивают связь судов с береговыми абонентами и другими судами. Состав радиооборудования МПС и МПСС зависит от морского района плавания судна. В соответствии с требованиями ГМССБ на судах для морских районов А1/А2/А3/А4 устанавливаются типовые составы радиооборудования, приведенные на рис. 1 – 4 [1], с сертификатами одобрения типа аппаратуры. Оборудование типового состава соответствует требованиям ГМССБ. На рис. 5 представлено оборудование спасательных средств [2]. Оборудование одинаково для района плавания судна, но зависит от тоннажа судна. Для судов водоизмещением от 300 до 500 регистровых тонн требуется один радиолокационный ответчик, для судов более 500 рег. т и всех пассажирских судах — не менее двух. На судах водоизмещением от 300 до 500 рег. т должно быть не менее двух ОВЧ-радиостанций, на судах более 500 и всех пассажирских — не менее трех ОВЧ-радиостанций [1].

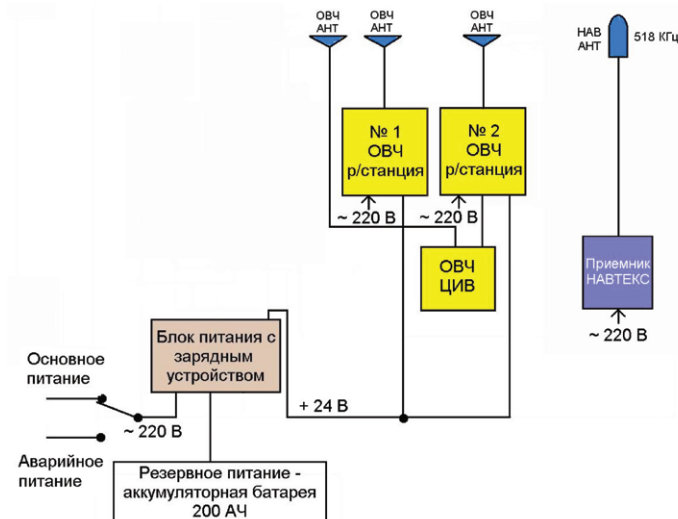


Рис. 1. Радиооборудование ГМССБ на судах международного плавания для морского района А1 (метод дублирования оборудования)

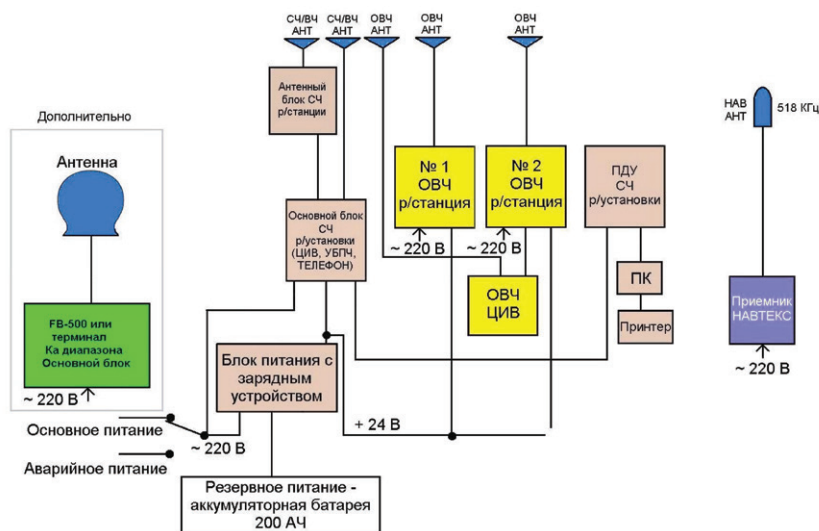


Рис. 2. Радиооборудование ГМССБ на судах международного плавания для морского района А2 (метод дублирования оборудования)

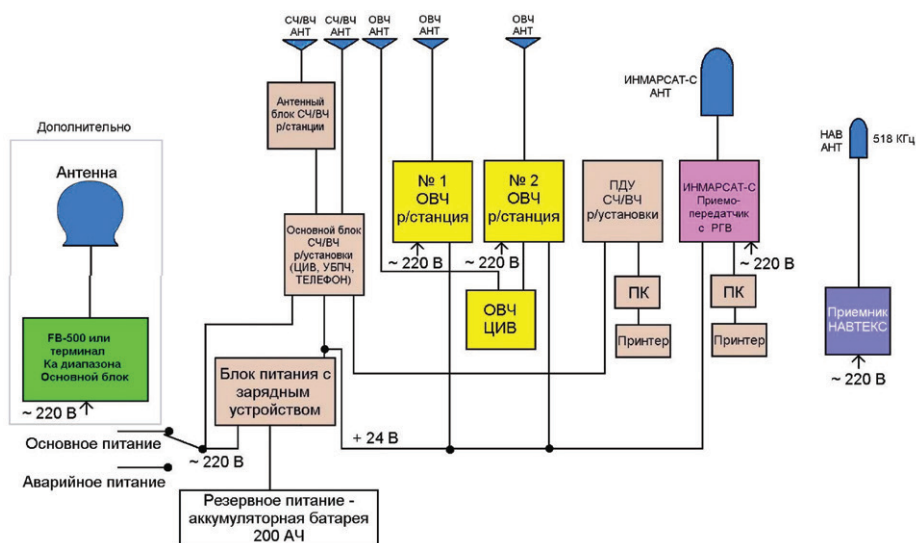


Рис. 3. Радиооборудование ГМССБ на судах международного плавания для морского района А3 (метод дублирования радиооборудования)

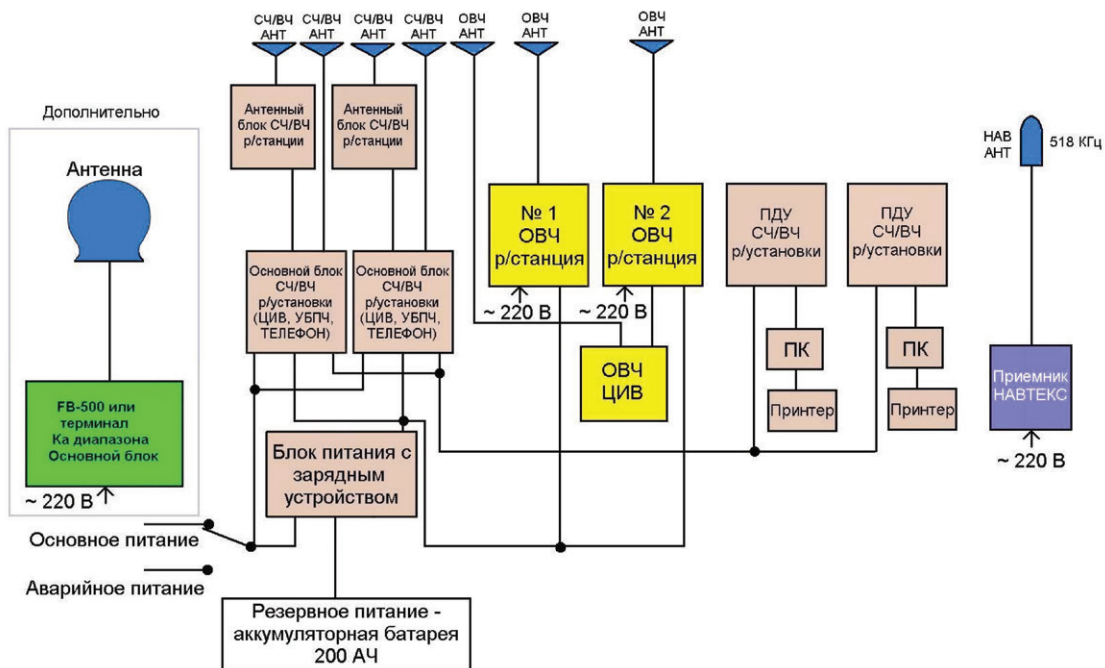


Рис. 4. Радиооборудование ГМССБ на судах международного плавания для морского района А3 или А4 (метод дублирования оборудования)

Спутниковый АРБ



АРБ КОСПАС-САРСАТ

Радиолокационный ответчик



ОВЧ радиостанции двусторонней связи



Рис. 5. Радиооборудование спасательных средств

Два статуса аппаратуры судовых средств связи

Оборудование судовых средств связи имеет два статуса: конвенционное (обязательное) оборудование (оборудование типового состава) и дополнительное оборудование.

Конвенционное оборудование, по требованию ГМССБ, имеет статус обязательного оборудования. Состав типового радиооборудования и сертификаты одобрения типа аппаратуры, установленной на судне, перед выходом в море проверяется администрацией морского регистра судоходства и, в случае несоответствия оборудования регламентированным требованиям, судну запрещается выход в море.

Дополнительное оборудование устанавливается на судне по решению судовладельца и должно обеспечивать большую надежность и оперативность ведения связи. Дополнительное оборудование не входит в типовой состав и по ряду параметров может не соответствовать требованиям ГМССБ.

Недостатки современного типового судового радиооборудования

Со дня основания ГМССБ в 1999 г. внедрено множество инноваций в технологии радиосвязи, одним из которых является переход с аналоговых методов формирования и обработки сигналов

связи на цифровые методы. При цифровом методе аппаратура имеет большую надежность, малые габариты, вес, технологична при массовом, серийном производстве. Однако инновации цифровых методов не коснулись аппаратуры связи ГМССБ, работающей в ОВЧ-, СЧ-, ВЧ-диапазонах волн. Как и 30 лет назад, судовые радиостанции этих диапазонов остались аналоговыми. Такое положение объясняется тем, что на всех судах радиостанции ОВЧ-, СЧ-, ВЧ-диапазонах имеют статус обязательного оборудования. Таких судов во всем мире тысячи. Необходимо согласие мирового сообщества, чтобы на судах одновременно поменялись принципы построения аналоговой аппаратуры связи МПС на цифровые [3], [4]. Необходимость перехода на цифровые методы рассматривались на 16-й сессии, в марте 2012 г. на подкомитете ИМО по радиосвязи, поиску и спасанию [5]. В приведенные типовые системы оборудования связи МПСС входят лишь спутниковые терминалы ИНМАРСАТ-С (ИНМАРСАТ mini-С). Эти терминалы не обеспечивают телефонную связь, работу в сети ИНТЕРНЕТ (кроме электронной почты E-mail). Скорость передачи данных мала — 600 бит/с [6].

Дополнительное оборудование, устанавливаемое на судах в виде спутниковых терминалов FB-500 или терминалов *Ka*-диапазона волн, исключает недостатки типового оборудования связи МПСС [7], так как эти терминалы по ряду параметров обладают наилучшими характеристиками среди выпускаемой аппаратуры.

В таблице приведены сравнительные характеристики судовых средств связи МПС и МПСС с учетом дополнительного оборудования.

Таблица

Сравнительные характеристики судовых средств связи МПС и МПСС с учетом дополнительного оборудования

Вид или тип судовой станции связи	Метод формирования сигналов	Дальность работы, км	Режимы работы	Скорость передачи при телеграфии, бит/с	Работа в сети ИНТЕРНЕТ	Оперативность связи	Стоимость трафика, \$/мин	Работа в составе ГМССБ	
МПС	ОВЧ-диапазон	Аналоговый	20 – 30	Телефон	Нет	Нет	Высокая	Практически бесплатный	Да
	СЧ-диапазон	Аналоговый	200 – 400	Телефон, ФАКС, телекс	100	Нет	Высокая	Практически бесплатный	Да
	КВ-диапазон	Аналоговый	Безгранична	Телефон, ФАКС, телекс	100	Нет	Зависит от состояния ионосферы	Практически бесплатный	Да
МПСС	Инмарсат-С	Цифровой	Глобальная до широты 70°	ФАКС, данные, телекс	600	Да, E-mail	Высокая	\$0,25 за 256 бит	Да
	FB-500	Цифровой	Глобальная до широты 70°	Телефон, ФАКС, данные	256000	Да	Высокая	1,8	Нет
	Терминал <i>Ka</i> -диапазона	Цифровой	Глобальная до широты 70°	Телефон, ФАКС, данные	5×10 ⁶	Да	Высокая	2,3	Нет

Однако типовое и дополнительное оборудование (терминалы FB-500 или терминалы *Ka*-диапазона волн) не решают проблему надежной и оперативной связи на широтах более 70° [8]. Спутниковые терминалы связи МПСС на этих широтах не работают, а радиостанции ВЧ-диапазона волн МПС имеют низкую надежность и оперативность связи ввиду следующих причин:

- сложность выбора частотного канала связи;
- низкая скорость телеграфии, не превышающей 100 бит/с;
- высокий уровень импульсных, атмосферных и промышленных помех;
- высокий уровень взаимных помех;
- высокий уровень замирания сигналов;
- возможность полного отсутствия связи при мощных вспышках на Солнце во время 11-летней солнечной активности.

Пути решения проблемы надежности и оперативности связи на широтах более 70°

Решить проблему надежной и оперативной связи с помощью терминалов МПСС на широтах более 70° возможно двумя путями [9]:

- использовать в системе спутниковой связи вместо геостационарных спутники на геосинхронных высокоэллиптических орбитах;
- использовать терминалы низкоорбитальной спутниковой системы связи ИРИДИУМ.

Орбитальная группировка из четырех спутников с использованием высокоэллиптических 12-часовых орбит типа МОЛНИЯ обеспечивает зоны радиовидимости одного из спутников с углами места, приведенными на рис. 6 [2], [4].

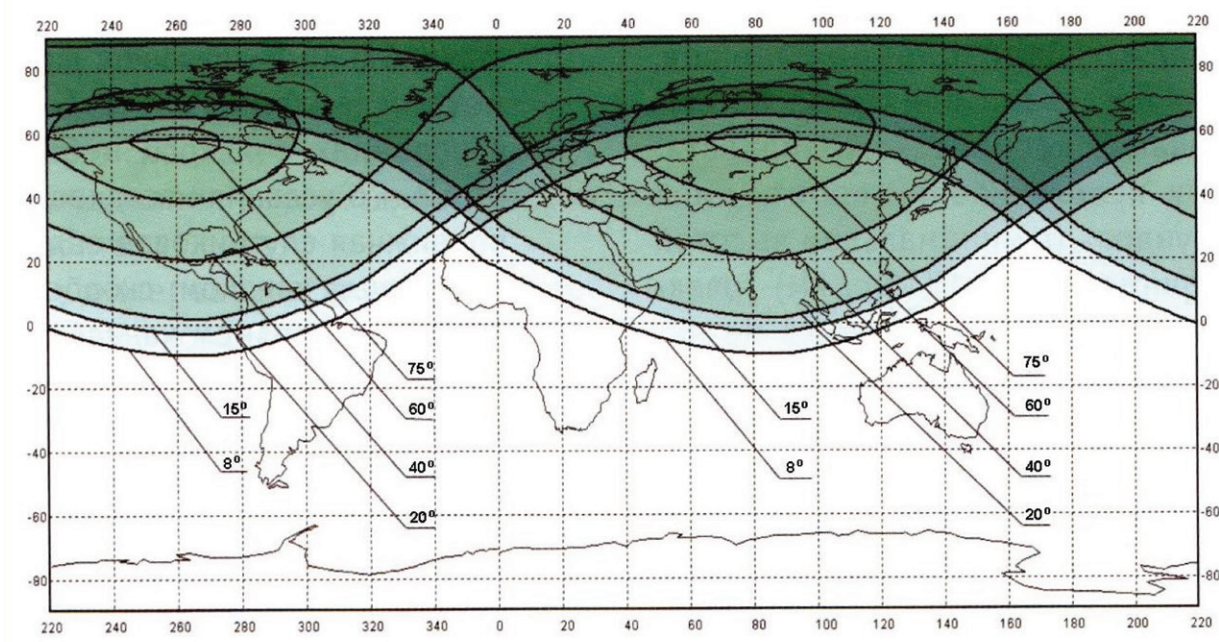


Рис. 6. Зоны радиовидимости, обеспечиваемые высокоэллиптическими орбитами типа МОЛНИЯ

Параметры орбит типа МОЛНИЯ:

- период обращения — около 43068 с;
- высота апогея — около 47170 км;
- высота перигея — от 750 до 3035 км;
- наклонение орбит — от 62,6 до 65,7°;
- аргумент широты перигея — от 257,9 до 295,7°.

Орбитальная группировка из трех спутников с использованием высокоэллиптических 24-часовых орбит типа ТУНДРА обеспечивает зоны радиовидимости одного из спутников с углами места, приведенными на рис. 7 [2], [4].

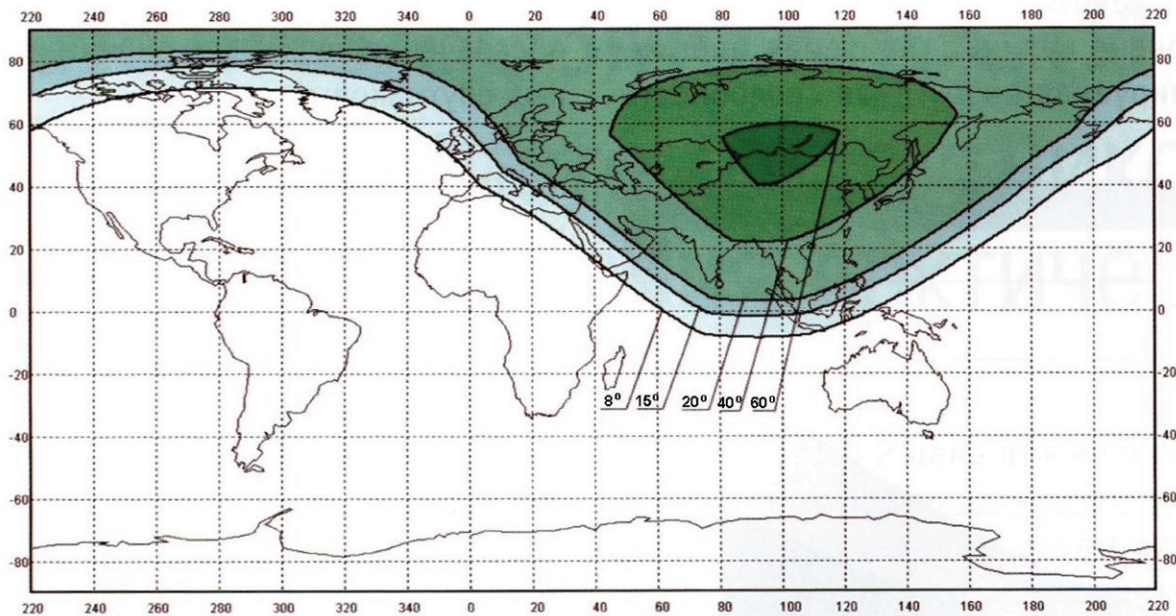


Рис. 7. Зоны радиовидимости, обеспечиваемые высокоэллиптическими орбитами типа ТУНДРА

Параметры орбит типа ТУНДРА:

- период обращения — около 86164 с;
- высота апогея — около 47170 км;
- высота перигея — от 24440 до 19000 км;
- наклонение орбит — 63,4°;
- аргумент широты перигея — 270°.

На спутниках с орбитами типов МОЛНИЯ и ТУНДРА должна быть установлена приемо-передающая ретрансляционная аппаратура системы ИНМАРСАТ. В этом случае терминалы ИНМАРСАТ-С, F-500 и др., установленные на судне, обеспечат работу на северной широте более 70°.

Второй путь решения проблемы связи на северных широтах — это использование спутниковой системы двойного (военного и гражданского) назначения ИРИДИУМ с помощью судовых терминалов IRIDIUM PILOT. Эти терминалы обеспечивают работу в режимах телефония, ФАКС, данные со скоростью до 134 кбит/с. На рис. 8 приведена схема соединений терминала IRIDIUM PILOT, обеспечивающая одновременную работу трех независимых телефонов и подключение терминалов к сети ИНТЕРНЕТ.

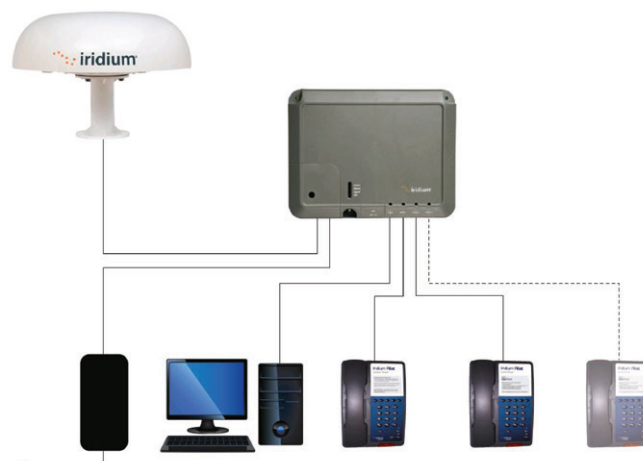


Рис. 8. Схема соединений терминала IRIDIUM PILOT для одновременной работы трех телефонов и подключение к сети ИНТЕРНЕТ

Перспективы развития судовых спасательных средств навигации и связи

На рис. 5 приведены виды судовых спасательных средств в соответствии с требованиями ГМССБ [2], [10]. В 2010 г. принято решение о включении в состав спутникового АРБ КОСПАС-САРСАТ передатчика АИС-аппаратуры. Излучаемая мощность передатчика — 12,5 Вт, дальность действия — 18 миль. Модернизированный АИС-АРБ (AIS-SART) будет дополнительно передавать на международных частотах 161,975 и 162,025 МГц восемь раз в минуту АИС-сообщения № 1 и № 14 с признаками бедствия. Эти сообщения будут приниматься не только проходящими судами, но и приемниками АИС-аппаратуры, установленными на спутниках. Сообщение № 1 содержит данные о гибнущем судне: MMSI — идентификационный номер судна, координаты, время, истинный курс, путевой угол, скорость. В сообщении № 14 передается информация о характере бедствия, требуемой помощи и др.

Выводы

Современный типовой состав судового радиооборудования и оборудования спасательных средств не отвечает новым потребностям и вынуждает судовладельца покупать дополнительное оборудование. При работе в северных широтах судовое спутниковое оборудование малоэффективно, состав радиооборудования нуждается в модернизации. Решением этих вопросов могут быть приводимые в статье варианты с использованием традиционной практически бесплатной аналоговой связи, использование спутников с высокоэллиптическими орбитами типа МОЛНИЯ и ТУНДРА в системе ИНМАРСАТ или использование альтернативных спутниковых систем. С появлением АИС требуется и изменение оборудования спасательных средств.

Заключение

Персональная связь на море в морском районе АЗ ГМССБ возможна с помощью мобильных спутниковых телефонов систем ИНМАРСАТ, ТУРАЙА, ГЛОБАЛСТАР, ИРИДИУМ. В морских районах АЗ/А4 ГМССБ персональная спутниковая связь возможна лишь с помощью мобильных спутниковых телефонов системы ИРИДИУМ и в ближайшей перспективе — спутниковых телефонов систем АЙКО и ОДИССЕЙ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маринич А. Н.* Современное судовое оборудование средств электронной навигации, ГМССБ и береговая единая система контроля и управления судоходством: монография / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов [и др.] / под ред. Ю. М. Устинова. — Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатского ГТУ, 2007. — 261 с.
2. *Кулинич А. И.* Перспективы развития судовых спасательных средств навигации и связи / А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк [и др.] // Спутниковые технологии и бизнес. — 2014. — № 11. — С. 40–44.
3. *Ильин А. А.* Цифровые терминалы спутниковых систем связи / А. А. Ильин, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк [и др.] / под ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Деан, 2005. — 192 с.
4. *Маринич А. Н.* Цифровые информационные потоки в судовых интегрированных системах навигации и системах связи / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 48–56.
5. Sub-committee on radiocommunications and search and rescue COMSAR. — 2012. — 16th session. — item 17.
6. *Кулинич А. И.* Мониторинг судов на северных широтах с помощью терминалов ИНМАРСАТ-С и ИНМАРСАТ-D+ / А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк [и др.] // Спутниковые технологии и бизнес. — 2013. — Декабрь. — С. 8–14.

7. Кулинич А. И. Простейшие судовые терминалы IsatData Pro и IsatPhone Pro для передачи данных и телефонии по системе Инмарсат / А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практич. конф. 31 марта 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — Т. 2. — С. 127–131.

8. Выгонский Ю. Анализ возможности создания системы спутниковой связи для обслуживания Арктического района / Ю. Выгонский, А. Кузовников, В. Головков // Спутниковые технологии и бизнес. — 2014. — № 5. — С. 24–31.

9. Маринич А. Н. Обзор мобильных спутниковых телефонов для персональной связи на море / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Спутниковые технологии и бизнес. — 2014. — № 12. — С. 80–83.

10. Общий каталог продукции серии NavNet FURUNO. — 2009 г. — 84 с.

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF SHIP COMMUNICATIONS AND RESCUE EQUIPMENT

The paper considers the issues of equipping courts with new modern means of communication and rescue depending on the navigation area of the vessel. The advantages and disadvantages of conventional systems and additional equipment are showed. In particular, it is shown that modern equipment has the problem of reliable and rapid communication at high latitudes. The ways of solving this problem as by using satellites in inclined orbits, and using a global satellite network IRIDIUM, AIKO, ODYSSEUS are showed. The paper considers work areas and parameters of the satellites on highly-elliptical orbits MOLNIYA, TUNDRA which are offered for work in Northern waters. The paper presents the changes in equipment and rescue tools. The paper presents materials on the upgraded buoy AIS- SART. Based on the above materials, the conclusion about the necessity of modernization of complex shipboard equipment was made.

Keywords: communications equipment , digital methods , geosynchronous highly elliptical orbits, GMDSS, AIS-SART.

REFERENCES

1. Marinich, A. N., A. V. Pripotnjuk, Ju. M. Ustinov, et al. *Sovremennoe sudovoe oborudovanie sredstv jelektronnoj navigacii, GMSSB i beregovaja edinaja sistema kontrolja i upravlenija sudohodstvom: Monografija*. Petropavlovsk-Kamchatskij: Kamchat. GTU, 2007.

2. Kulinich, A. I., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, Ju. M. Ustinov, and A. R. Shagibutdinov. “Perspektivy razvitija sudovyh spasatelnyh sredstv navigacii i svjazi.” *Sputnikovye tehnologii i biznes* November (2014): 40–44.

3. Il'in, A. A., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. *Cifrovye terminaly sputnikovyh sistem svjazi*. SPb.: Dean, 2005.

4. Marinich, A. N., A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. “Digital information streams in the ship integrated systems of navigation and communication systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 48–56.

5. Sub-committee on radiocommunications and search and rescue COMSAR. 2012. 16th session. Item 17.

6. Kulinich, A. I., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. “Monitoring sudov na severnyh shirotah s pomoshh'ju terminalov INMARSAT-S i INMARSAT-D+.” *Sputnikovye tehnologii i biznes* December (2013): 8–14.

7. Kulinich, A. I., A. N. Marinich, Ju. M. Ustinov. “The simplest marie terminal IsatData Pro and IsatPhone Pro for data and telephony services on the Inmarsat system.” *Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. 31 marta 2015 g.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm.S.O. Makarova, 2015. T. 2. 127–131.

8. Vygon'skij, Ju., A. Kuzovnikov, and V. Golovkov. “Analiz vozmozhnosti sozdaniya sistemy sputnikovoj svjazi dlja obsluzhivaniya Arkticheskogo rajona.” *Sputnikovye tehnologii i biznes* May (2014): 24–31.

9. Marinich, A. N., A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. “Obzor mobilnyh sputnikovyh telefonov dlja personalnoj svjazi na more.” *Sputnikovye tehnologii i biznes* December (2014): 80–84.

10. Obshhij katalog produkcii serii NavNet FURUNO. 2009 g.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Устинов Юрий Матвеевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_tsn@gumrf.ru
Припотнюк Андрей Владимирович —
инструктор МУТЦ, методист направления ГМССБ.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
apripotnyuk@mts.spb.su, kaf_tsn@gumrf.ru
Кулинич Андрей Иванович — аспирант.
Научный руководитель:
Устинов Юрий Матвеевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_tsn@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ustinov Yuriy Matveevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_tsn@gumrf.ru
Pripotnyuk Andrey Vladimirovich —
instructor of Makarov training centre.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
apripotnyuk@mts.spb.su
Kulinich Andrey Ivanovich — postgraduate.
Supervisor:
Ustinov Yuriy Matveevich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_tsn@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2016 г.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК: 556.16 (556.51)

**В. В. Сахаров,
А. А. Чертков,
С. В. Сабуров**

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ РЕЧНЫХ ПОТОКОВ ВОДНЫХ КОММУНИКАЦИЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ

Решение проблемы потокораспределения в многоконтурных электрических и гидравлических сетях и системах составляет основу создания современных технологий моделирования гомогенных и гетерогенных сред в установившихся и переходных режимах. С учетом широкого спектра приложений проблемы потокораспределения на объектах водного транспорта и в различных сферах производства важной технической задачей является развитие и создание новых эффективных способов анализа и синтеза многоконтурных сетей с использованием численных методов оптимизации, идентификации и параметрической оценки. В этой связи в работе рассматривается модель и алгоритм расчета расходов воды в рукавах разветвленного участка водной коммуникации, основанный на принципе наименьшего действия Максвелла. Минимизация потерь мощности потока, расходуемой на перемещение жидкости по руслу, оценивается с помощью алгоритма открытого поиска, относящегося к классу генетических алгоритмов. В основу разработки алгоритма анализа и синтеза нелинейных гидравлических сетей со сложной структурой положены технологии термодинамического моделирования, базирующиеся на топологической общности электрических и гидравлических схем, а также на фундаментальном положении о движении транспортных сред по единым законам течения, сохранения массы и энергии. Современные водные транспортные сети с многорукавными разветвлениями русел характеризуются высокой размерностью, сложной зависимостью технологических параметров от структуры и параметров сетей, а также внешних условий, что значительно усложняет разработку моделей многорукавных разветвлений и проведение машинных экспериментов для получения оценок расходов воды на стадии проектирования и эксплуатации. Предложенные способы расчета потокораспределения применены для решения конкретных задач. Приведены примеры для подтверждения корректности выполненных решений.

Ключевые слова: расходы воды, водные транспортные сети, многорукавные разветвления реки, технологии термодинамического моделирования, потокораспределение, принцип наименьшего действия.

Вводная часть

Выполнение дноуглубительных работ и планирование мероприятий по улучшению судоходных условий на реках определяют необходимость оценки расходов воды в многорукавных разветвлениях русел и отметок уровней воды в узлах разветвлений расчетным путем. Оценки могут быть многовариантными, относящимися к различным полным расходам воды в реке и варьируемым модулям сопротивления рукавов. Использование математических моделей многорукавных разветвлений русла для выполнения расчетов рабочих параметров способствует существенному ускорению процесса поиска эффективных решений по поддержанию гарантированных глубин на отдельных участках водного пути. Модели многорукавных разветвлений являются нелинейными, обладающими высокой чувствительностью к вариации параметров, поэтому решение задачи и получение количественных оценок рабочих параметров должны базироваться на использовании эффективных вычислительных процедур, обеспечивающих высокую скорость сходимости итерационных процессов.

Река является открытой гидравлической сетью, поэтому процессы в ней могут анализироваться на основе общей теории сетей различного назначения, допускающих оценки параметров в установившихся режимах по обобщенным показателям, например приведенным в [1] – [4].

Для расчета распределения расходов воды по рукавам разветвления реки допустимо применение квазистатических моделей, рассмотренных подробно в [5] и рекомендованных для использования в линейных организациях водных путей. Специфика моделирования, состоящая в допущении унимодальности характеристик отдельных элементов (ветвей) сети, определяет возможность получения единственности и обеспечения устойчивости решения. Как и любая другая сеть со сложной топологией, многорукавное разветвление русла в общем случае имеет n узлов и m рукавов. Для каждого i -го рукава, $i = 1, \dots, m$, предварительно рассчитываются модули сопротивлений b_i . Модули сопротивлений являются нелинейными функциями длины отдельных участков i -го рукава, площадей их живого сечения, глубин, коэффициента шероховатости и др. При составлении модели принимается, что расход воды Q_i в i -м рукаве связан с отметками свободной поверхности на его концах Z_{iH} и Z_{iK} с помощью нелинейного уравнения, имеющего вид

$$Z_i = b_i \cdot Q_i^{p_i}, \quad (1)$$

где $Z_i = Z_{iH} - Z_{iK}$; b_i — модуль сопротивления i -го рукава; p_i — постоянное число (показатель степени).

Уравнения вида (1), по существу, являются уравнениями движения жидкости, Z_i — падение свободной поверхности в i -м рукаве. Для k -го узла, к которому по S рукавам подводится вода, а по R — отводится, можно записать уравнение неразрывности потока, согласно которому сумма расходов в узле равна нулю, т. е.

$$\sum_{j=1}^S Q_{jk} - \sum_{z=1}^R Q_{zk} = 0. \quad (2)$$

Заметим, что в принятой модели узел не является буфером (накопителем). Обычно показатель степени p_i в уравнении (1) для турбулентных потоков принимается равным двум. В других случаях его значение можно оценить по эксперименту методом наименьших квадратов либо использовать иные методы оптимальных оценок. Таким образом, при заданном значении полного расхода воды в реке Q , заданной структуре разветвления русла (топологии сети), известных b_i и p_i необходимо определить Q_i и Z_i для всех $i = 1, \dots, m$ путем совместного решения уравнений (1) и (2). Уравнения вида (1) являются составляющими замкнутых независимых контуров, определяемых топологическими свойствами конкретного многорукавного участка водной коммуникации.

Из соотношений (1) и (2) видно, что каждый рукав, обладающий соответствующим модулем сопротивления, является аналогом ветви в электрической цепи, активное сопротивление которой численно равно этому модулю. Расход Q_i есть аналог тока в i -й ветви, а величина Z_i аналогична падению напряжения на i -й ветви. Что касается отметок уровней в узлах разветвления, то эти понятия эквивалентны потенциалам узлов.

Если расчетная схема разветвления реки содержит n узлов и d независимых контуров, то число уравнений, подлежащих решению, равно

$$(n + d - 1).$$

Уравнение (2) аналогично первому закону Кирхгофа для электрической цепи, согласно которому алгебраическая сумма токов, подтекающих к любому узлу схемы, равна нулю.

С помощью уравнений (1) для каждого замкнутого независимого контура можно составить уравнения вида

$$\sum_{i=1}^v b_i Q_i^{p_i} = \sum_{i=1}^v Z_i, \quad (3)$$

где v — число рукавов, входящих в контур.

Уравнение (3) аналогично второму закону Кирхгофа в электрической цепи, согласно которому алгебраическая сумма напряжений вдоль любого замкнутого контура равна нулю, т. е.

$$\sum_{i=1}^v Z_i = 0, \quad (4)$$

что справедливо для контура, не содержащего источников ЭДС.

Несмотря на кажущуюся простоту приведенных уравнений (2) – (4), их решение при высокой размерности задачи и различных p_i представляет собой непростую задачу. Метод аналогий позволяет применить любой из известных методов расчета электрических цепей непосредственно для расчета многорукавных разветвлений рек и других сетей. В частности, для анализа процессов потокораспределения в сложных гидравлических сетях можно применять принцип наименьшего действия Д. К. Максвелла, рассмотренный в [6], [7]. Широко используемый в электрических цепях и сетях, этот принцип позволяет выполнять расчеты на базе современных численных методов оптимизации и исследовать сложные энергетические процессы в сетях на качественно новом уровне. Он определяет взаимную связь задач математического программирования в электротехнике с аналогичными задачами потокораспределения в других средах, обладающих экстремальными свойствами расхода энергии на транспортирование жидкости.

Основная часть

Принцип наименьшего действия является одним из наиболее общих физических принципов, определяемых природными свойствами большого класса физических систем. Он практически соблюдается во всех сетях и сетевых системах самого различного назначения. Согласно принципу наименьшего действия, в транспортной сети, в частности в открытой гидравлической сети, существует физическая величина, называемая *действием*, которая при совершении транспортной работы принимает наименьшее значение. Эта величина имеет размерность произведения времени и работы. Применительно к стационарному течению жидкости в открытых руслах действие не зависит от времени. Поэтому минимум действия должен определяться непосредственно минимумом энергии, рассеиваемой системой (в виде тепла) за каждую единицу времени.

Основанный на работах Максвелла и Кирхгофа экстремальный принцип потокораспределения в открытых гидравлических сетях может быть сформулирован в следующей форме: потоки в открытой гидравлической сети распределяются по ветвям (рукавам) таким образом, что этими потоками производится наименьшее количество теплоты. Следовательно, энергия, затрачиваемая на транспортирование жидкости по сети в единицу времени, является величиной минимальной, что справедливо при условии соблюдения материального баланса во всех узлах цепи.

При моделировании процессов в пассивных сетях, для которых строго не фиксируются условия взаимодействия с окружающей средой (притоки и стоки в узлах, изменяющийся вектор расходов и отметки уровней в узлах, вызванные внешними условиями, и др.), стационарный процесс может не соблюдаться. Если же в каждом сечении сети эти параметры поддерживаются постоянными, т. е. соблюдается равенство отметок уровней во всех точках внутри выделенного сечения реки, равенство расходов по сечениям, то транспортируемый поток проходит через последовательность равновесных состояний и его движение подчиняется принципу наименьшего действия.

Если в уравнении (1) показатель степени $p_i = 2$, каждое значение Z_i является квадратичной функцией расхода Q_i в i -м рукаве. Тогда мощность сети, потребляемую на транспортирование полного расхода реки Q через участок водной коммуникации, состоящий из m ветвей, можно представить суммой кубических парабол:

$$F = \sum_{i=1}^m b_i Q_i^3, \quad (5)$$

где b_i — модуль сопротивления i -го рукава.

В математической постановке, согласно исследованиям [6] – [8], задача потокораспределения в разветвленной коммуникационной сети формулируется следующим образом:

найти

$$J = \min F = \min \sum_{i=1}^m b_i Q_i^3 \quad (6)$$

при соблюдении условий (2) для всех k , $k = 1, \dots, n$, и (3). Линейные и нелинейные ограничения принято представлять в векторно-матричной форме:

$$A_{eq} \cdot q = b_{eq}; \quad (7)$$

$$f(q) = 0, \quad (8)$$

где $q = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_m]$ — вектор расходов рукавов; A_{eq} — матрица размерности $(n \times m)$, состоящая из элементов, равных 1, либо -1 , и соответствующая первому закону Кирхгофа; b_{eq} — вектор, содержащий численные значения расходов воды, подводимых и отводимых от сети в узлах (полный расход реки, сбросы воды за пределы сети и др.); $f(q)$ — нелинейная вектор-функция, подлежащая «обнулению» и соответствующая ограничениям, определяемым вторым законом Кирхгофа.

Для решения экстремальной задачи (6) – (8), сформулированной в терминах принципа наименьшего действия, воспользуемся алгоритмом открытого поиска из класса генетических алгоритмов. Алгоритм отличается простотой, универсальностью и высокой степенью адаптации к поиску экстремумов функций со сложной формой гиперповерхности. Для него не требуется информация о значении градиентов или высших производных непрерывных функций, обычно используемых в итерационных процессах для оценки шага и скорости приближения к точке оптимума. Оценка критерия качества производится по множеству точек, расположенных вокруг текущей точки, путем выбора одной из них, где критерий принимает наименьшее из всех оцениваемых значений. В вычислительной среде MatLAB алгоритм открытого поиска реализуется с помощью функции `patternsearch` [9].

Применение алгоритма рассмотрим на конкретном примере, приведенном в [5, с. 87–89]. Структура и параметры многорукавного разветвления водной коммуникации представлены на рис. 1. Разветвление состоит из семи ветвей и шести узлов, обозначенных на рисунке соответствующими индексами.

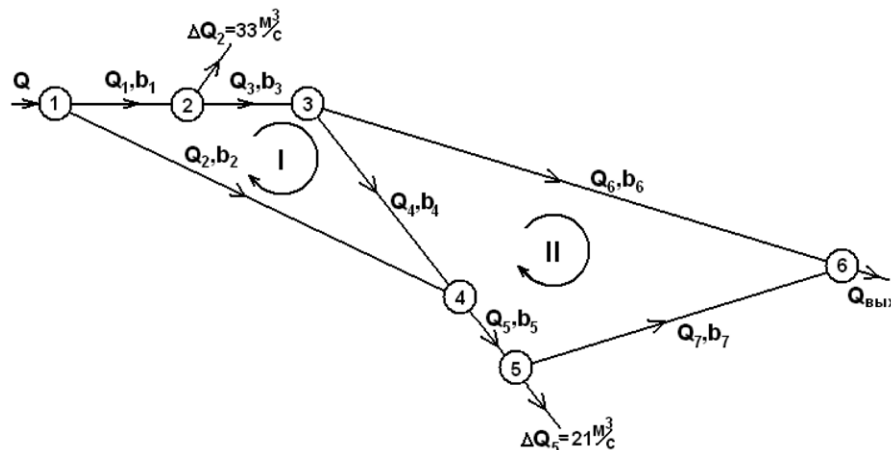


Рис. 1. Схема многорукавного разветвления русла реки

Приток к первому узлу равен Q . Он представляет собой полный расход воды в реке. В узлах 2 и 3 производится отвод воды с фиксированными расходами. Расходы и модули сопротивлений соответствующих рукавов обозначены символами Q_i и b_i , $i = 1, 2, \dots, 7$. $Q_{\text{ВЫХ}}$ — расход на выходе разветвления, являющийся функцией Q . Математическая модель (6) – (8) применительно к разветвлению (рис. 1) имеет следующий вид.

1. Критерий качества

$$J = \min \sum_{i=1}^7 b_i Q_i^3.$$

2. Ограничение-равенство, согласно первому закону Кирхгофа, содержит составляющие:

$$b_{eq} = [Q \ \Delta Q_2 \ 0 \ 0 \ \Delta Q_5]; \quad A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Ограничения приведены для первых пяти узлов. Шестой узел не учтен, поскольку при этом образуется линейно зависимая система уравнений.

3. Нелинейные ограничения составлены для двух контуров (см. обозначения на рис. 1 контуров I и II):

$$f(q) = \begin{bmatrix} b_1 \cdot Q_1^2 + b_3 \cdot Q_3^2 + b_4 \cdot Q_4^2 - b_2 \cdot Q_2^2 \\ b_6 \cdot Q_6^2 - b_7 \cdot Q_7^2 - b_5 \cdot Q_5^2 - b_4 \cdot Q_4^2 \end{bmatrix}.$$

Поиск расходов воды в рукавах выполним на базе вычислительного алгоритма с помощью файла sah374.m. В нем сохранены численные значения параметров из примера, приведенного в [5]. В данном файле кроме расчетов, выполненных в цикле с шагом дискретности 20 м³/с для полного расхода воды в реке $Q = 819$ м³/с, получены решения при вариации полного расхода в диапазоне $500 \leq Q \leq 1500$. Из полученных численных значений сформирована матрица Q_r , размерности (7×51), которая использована для графических построений.

Фрагмент программы оптимизации расходов воды в рукавах реки по алгоритму открытого поиска приведен далее.

% ОПТИМИЗАЦИЯ ПО АЛГОРИТМУ ОТКРЫТОГО ПОИСКА.

% Определение целевой функции:

```
lpr=@(q) b1*q(1).^3+b2*q(2).^3+b3*q(3).^3+b4*q(4).^3+b5*q(5).^3+...
    b6*q(6).^3+b7*q(7).^3;
```

% Реализация алгоритма открытого поиска:

```
[q,J]=patternsearch(lpr,q0,[],[],Aeq,beq,lb,ub);
```

```
Qr=[Qr q];
```

```
end
```

```
Qr;
```

% Графические построения:

```
Q=500:20:1500;
```

```
plot(Q,Qr),grid
```

% Проверка выполнения ограничений-равенств:

```
z=Aeq*q;
```

```
[z beq]
```

На рис. 2 приведены графики, представляющие зависимости расходов в рукавах от полного расхода воды, Q м³/с, в реке. Численные результаты расчета для $Q = 819$ м³/с представлены в таблице, помещенной в верхнем левом углу рис. 2.

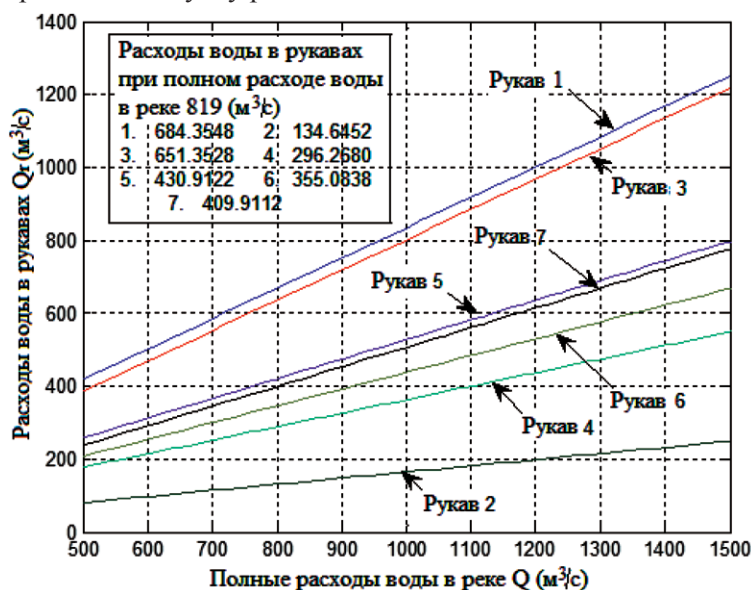


Рис. 2. Зависимость расходов воды в рукавах от наполнения русла

Теперь выполним расчет исходя из предположения, что показатели степени в модели (1) не обязательно равны двум. Это приведет к различным показателям степени в критерии качества (6).

Для определенности при прежних значениях модулей сопротивлений рукавов сформируем критерий следующим образом:

$$k=1.0e-08;$$

$$d=[4.61 \ 431.5 \ 5.67 \ 37.12 \ 12.8 \ 160.1 \ 86.6]*k;$$

$$J1=d*[q(1).^2.8 \ q(2).^3.1 \ q(3).^3.05 \ q(4).^2.6 \ q(5).^3 \ q(6).^2.78 \ q(7).^2.95]^.$$

Тогда для полного расхода $Q=819 \text{ м}^3/\text{с}$ получим следующее распределение расходов воды по рукавам:

```
q1 =
    735.8518
     83.1472
    702.8508
    250.6980
    333.8442
    452.1518
    312.8432
```

Критерий качества:

```
J1 = 99.9412
```

Проверка выполнения ограничений:

```
[Aeq*q1 beq]
ans =
    818.9990  819.0000
    33.0010  33.0000
     0.0010   0
     0.0010   0
    21.0010  21.0000
```

Контрольная сумма расходов в первом и втором рукавах, равная полному расходу в реке, $Q = 819 \text{ м}^3/\text{с}$:

```
q1(1)+q1(2)
ans =
    818.9990
```

Заключительная часть

Из текста файла следует, что нелинейные ограничения — равенства (п. 3), составленные по второму закону Кирхгофа, в явном виде не использованы. Они учтены в неявной форме в процессе минимизации критерия качества, характеризующего энергетику распределения расходов воды по рукавам.

Принцип наименьшего действия и алгоритм открытого поиска составляют эффективное средство моделирования расходов жидкости в сложных гидравлических сетях различного назначения и технических системах, используемых на объектах водного транспорта. Кроме того, метод и численные алгоритмы оптимизации, базирующиеся на принципе наименьшего действия, свидетельствуют о возможности их использования для расчетов параметров стационарных режимов в нелинейных электрических и гидравлических сетях. При высокой размерности сетей следует использовать в нелинейном программировании принципы декомпозиции. Приведенные примеры подтверждают корректность предложенных решений.

Повышение эффективности и качества моделирования стационарных процессов потокораспределения в сетях и сетевых системах различного назначения экстремальными методами с использованием компьютерных технологий представляет собой самостоятельную научную проблему, получившую важные приложения [10] – [12] на водном транспорте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меренков А. П. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения / А. П. Меренков, Е. В. Сеннова, С. В. Сумароков [и др.]. — Новосибирск: Наука, 1992. — 405 с.
2. Kaganovich B. M. On the area of equilibrium thermodynamics application / B. M. Kaganovich, A. V. Kelko, V. A. Shamansky, I. A. Shirkalin // Proc. of ASME 2044 International Mech. Eng. Congress. November, 13 – 19. — Anaheim, California, USA, 2004. — С. 197–203. DOI:10.1115/IMECE2004-60775.
3. Ottinger H. C. Beyond Equilibrium Thermodynamics / H. S. Ottinger. — Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005. — 635 p.
4. Каганович Б. М. Термодинамика теории цепей и их совместные применения в энергетических исследованиях / Б. М. Каганович, Н. И. Воропай, В. А. Стенников [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2014. — № 5. — С. 3–15.
5. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MATLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.
6. Сахаров В. В. Балансовые модели и их применение в автоматизированных системах управления производством / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 46–53.
7. Сахаров В. В. Моделирование стационарных режимов в электрических и гидравлических сетях средствами нелинейного программирования / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 156–164.
8. Мазур Г. С. Определение расходов воды речных потоков при минимуме полевых измерений / Г. С. Мазур // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Наука о Земле». — 2009. — Т. 1. — № 1. — С. 93–106.
9. Дьяконов В. П. Математические пакеты расширения MatLAB. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.
10. Магомедова А. В. Результаты компьютерного моделирования гидравлических процессов на устьевом участке русла реки Терек с использованием программного комплекса TEREKFLOODGIS / А. В. Магомедова, М. А. Гуруев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2008. — № 14. — С. 126–132.
11. Савичев О. Г. Метод определения характерных расходов воды рек гумидных областей Западной Сибири при отсутствии данных наблюдений / О. Г. Савичев, В. В. Паромов // Фундаментальные исследования. — 2013. — №№ 10 – 14. — С. 3157–3160.
12. Richter Brian D. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity / Brian D. Richter, M. Ruth, D. L. Harrison, R. Wigington // Ecological Applications. — 2003. — Vol. 13. — Issue 1. — Pp. 206–224. DOI: 10.1890/1051-0761(2003)013[0206:ESWMMR]2.0.CO;2.

MODELING COSTS WATER RIVER FLOWS OF WATER COMMUNICATIONS ON THE BASIS OF THE PRINCIPLE OF LEAST ACTION

The solution of the flow distribution in multi-loop electric and hydraulic networks and systems is the basis of creation for modern technologies modeling of homogeneous and heterogeneous media under steady state and transient conditions. Given the wide range of application problems of flow for the water transport units and in different spheres of production, an important technical challenge is the development and creation of new, effective methods of analysis and synthesis of multiple loop networks using numerical optimization methods, identification and parametric estimation. In this regard, the paper discusses the model and algorithm of calculation of water flow in the branched sleeves of the water utilities, based on the principle of least action Maxwell. Minimization of power loss of flow consumed for moving fluid through the channel, estimated using the open search algorithm belonging to the class of genetic algorithms. The basis for the development of algorithm analysis and synthesis of nonlinear hydraulic networks with complex structure technology based on thermodynamic modeling based on topological generality of the electrical and hydraulic circuits, and on the fundamental regulations on the movement of a vehicle by the same laws of flow, conservation of mass and energy. Modern water transport network with multi-hoses branching channels are characterized by high dimensionality and complex dependence of technological parameters of the structure and parameters of the networks, as well as external conditions, which greatly complicates the development of the suitability

models of the multi-sleeved branching and carrying out engine experiments to obtain estimates of water consumption at the stage of design and operation. The proposed model and algorithm of calculation of the power flows is applied to solve specific tasks. These examples confirm the correctness of the performed studies.

Keywords: costs water, water transportation networks, River with many sleeves, thermodynamic modeling, flow-distribution, principle of least action.

REFERENCES

1. Merenkov, A. P, E. V. Sennova, S. V. Sumarokov, et al. *Mathematical simulation and optimization of heat-, water-, oil-, and gas supply*. Novosibirsk: Nauka, 1992.
2. Kaganovich, B. M., A. V. Kelko, V. A. Shamansky, and I. A. Shirkalin. "On the area of equilibrium thermodynamics application." *Proc. of ASME 2004 International Mech. Eng. Congress. November, 13 – 19. Anaheim, California, USA, 2004*: 197–203. DOI:10.1115/IMECE2004-60775.
3. Ottinger, H. S. *Beyond Equilibrium Thermodynamics*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
4. Kaganovich, B. M., N. I. Voropai, V. A. Stennikov, and M. S. Zarodnyuk. "Thermodynamics and circuit theory, their joint application in energy research." *Izvestija Rossiyskoy akademii nauk. Energetika* 5 (2014): 3–15.
5. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizatsii tehnologicheskikh prostesov na ob'ektah vodnogo transporta v srede MATLAB. Monographija*. Spb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015.
6. Saharov, V. V., and A. A. Kuzmin. "Balance models and their application in automatic control systems for production management." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2013): 46–53.
7. Saharov, V. V., A.A. Chertkov, S. V. Saburov. "Simulation of stationary regimes in electric and hydraulic networks by means of nonlinear programming." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 156–164.
8. Mazur, G. S. "Discharge determination river streams by minimum field work." *The Bulletin of Irkutsk State University. Series «Earth Sciences»* 1.1 (2009): 93–106.
9. D'konov, V. P., and V. V. Kruglov. *Matematicheskie pakety rasshirenija MATLAB. Spetsialny spravochnik*. Spb.: Piter, 2001.
10. Magomedova, A. V., and M. A. Ghuruyev. "The results of the computer modelling of hydraulic processes in the mouth section of the river Terek's bed with the use of the TerekFloodGIS programme complex." *Vestnik of Dagestan State Technical University. Technical Science* 14 (2008): 126–132.
11. Savichev, O. G., and V. V. Paromov. "Method of the estimation of characteristics of the runoff flow at absence of supervision." *Fundamental research* 10-14 (2013): 3157–3160.
12. Richter, Brian D., Mathews Ruth, David L. Harrison and Robert Wigington. "Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity." *Ecological Applications* 13.1 (2003): 206–224. DOI: 10.1890/1051-0761(2003)013[0206:ESWMMR]2.0.CO;2.

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, kaf_electricalautomatic@gumrf.ru
 Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант. Научный руководитель: Сахаров Владимир Васильевич ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» kfspguyk@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov Vladimir Vasilevich — Dr. of Technical Sciences, 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
 Saburov Sergey Valerevich — Postgraduate. Supervisor: Saharov Vladimir Vasilevich. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping kfspguyk@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 27 декабря 2015 г.

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ГРУППЫ СУДОВ

Решается задача построения кратчайших маршрутов для группы судов, получивших задание достижения условных целей с известными координатами, расположенных в ограниченном пространстве. Рассмотрен случай, когда число целей у всех судов одинаковое. Задача считается выполненной при достижении судами всех своих целей. Предлагается два алгоритма решения задачи координации действий судов с расчетом минимальных по длине маршрутов. Эффективность решения задачи по выбору маршрутов оценивается по времени ожидания судна, последним достигшего цель. Решается задача об оптимальном выборе начальных положений судов. Численный эксперимент обнаруживает экстремальные значения параметра распределения судов в предположении о равномерном их распределении по заранее выбранной прямой. Предложенные алгоритмы и выводы из их анализа могут найти применение в организации движения морского, воздушного и наземного транспорта.

Ключевые слова: маршрут, цель, алгоритм, оптимизация пути, групповое управление, транспорт.

Введение. Постановка задачи

Выбор кратчайшего маршрута для судна, летательного аппарата или наземного транспорта определяет его эффективность и экономичность. Такие задачи для отдельных судов, или в терминологии робототехники — агентов, решаются методами дискретной математики, в частности, известны алгоритмы на графах Дейкстры, Беллмана — Форда и др. [1, с. 44]. Не менее эффективны методы искусственного интеллекта на основе нейронных сетей [2], позволяющие рассчитывать меняющиеся со временем условия [3], [4] и генетические алгоритмы [5] – [7]. Более сложные задачи для группы агентов, в том числе задачи о коллективном покрытии операционных пространств, решаются с использованием вероятностных методов и координаций действий агентов на заранее выделенных подпространствах.

Новый подход к решению задачи об управлении группой роботов, основанный на идеях коллективного взаимодействия, предложенный С. Г. Капустяном и его коллегами, отражен в [7], [8]. В [9] – [11] А. И. Кобрин и его учеников разработан алгоритм выделения операционных подпространств в среде группы роботов в условии их коллективной работы. Необходимость такого разделения возникает при решении задачи покрытия территории группой роботов для разрешения коллизий и оптимизации результатов. В [12], [13] описан аппаратный комплекс мобильного исследовательского робота, созданного для изучения многоагентных кооперативных алгоритмов управления группой роботов. Возможность применения вероятностных подходов к решению поставленной задачи изучена в [14]. Проблеме разрешения конфликтных ситуаций в работе коллектива роботов посвящена работа [15]. В [16] предлагается использование асинхронного событийно-ориентированного подхода в разработке программного обеспечения роботов, отличающегося более быстрыми итерациями разработки и тестирования алгоритмов с помощью аппаратного обеспечения. Нейросетевые методы решения задачи применены в алгоритмах [17], [18]. Область применения решений подобных оптимизационных задач весьма широка — от выбора маршрутов судов [19] и мобильных роботов в системе обслуживания и военном деле [20] до трехмерных задач планирования путей подводных аппаратов при стационарных [21] – [24] и нестационарных условиях [25].

Из множества задач о планировании путей многоагентных систем рассмотрим задачу о планировании маршрутов централизованной системы с равномерным распределением количества целей по агентам. Подобная задача моделирует, например, реальную ситуацию о распределении областей промыслов в рыболовецкой компании между отдельными судами. Предполагается, что места расположений целей (координаты мест промыслов, богатых добычей) разведаны и известны центральному управлению. Ставится задача выбора начальных точек (портов)

для сокращения времени работы. Время работы определяется по времени T_{\max} достижения цели последним из агентов. Эффективность планирования определяется по относительному времени ожидания $\Delta = (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max}$ агента, первым выполнившим задачу за время T_{\min} . Скорость движения агентов предполагается одинаковой, временем «обработки» целей пренебрегаем, поэтому, если скорость агента принять за единицу, время выполнения задачи можно условно считать равным длине всего маршрута. Моделируем операционное пространство плоскостью $x - y$ с начальным местом расположения агентов на оси y . Цели — точки на плоскости с координатами $x_k, y_k, k = 1, \dots, n$, текущие координаты агентов $\xi_k, \eta_k, k = 1, \dots, m$. Для упрощения постановки примем число целей кратным числу агентов $n = Nm$. Таким образом, каждый агент проходит N целей. Сначала рассмотрим два алгоритма решения задачи о планировании маршрутов минимальной длины.

Алгоритм I

На первом этапе, начинающемся от положения агентов $\xi_{k,1} = 0, \eta_{k,1}, k = 1, \dots, m$, определяются минимальные расстояния от начальных положений агентов до целей. Второй индекс 1 здесь означает номер этапа, всего этапов N . Рассмотрим некоторую конкретную модельную задачу (рис. 1) для пяти агентов (судов) и пятнадцати целей ($m = 5, n = 15$). По осям координат отложены расстояния в километрах. Скорость судна примем 10 уз (18,5 км/ч). Может оказаться, что у нескольких агентов будет выбрана одна цель. В этом случае выбирается агент, у которого расстояние до цели меньше, цель закрепляется за этим агентом и выбывает из множества целей на следующем цикле алгоритма. Первый этап с циклическим (не более m циклов) перебором минимальных расстояний заканчивается, когда каждый агент получит по закрепленной за ним цели с координатами $x_{k,1}, y_{k,1}, k = 1, \dots, n$ (рис. 2). На следующем, втором, этапе агенты перемещаются в свои найденные цели, т. е. $\xi_{k,2} = x_{k,1}, \eta_{k,2} = y_{k,1}, k = 1, \dots, m$, и алгоритм повторяется с первого этапа, но с уменьшенным на m (по числу агентов) числом целей и выбранными маршрутами первого этапа.

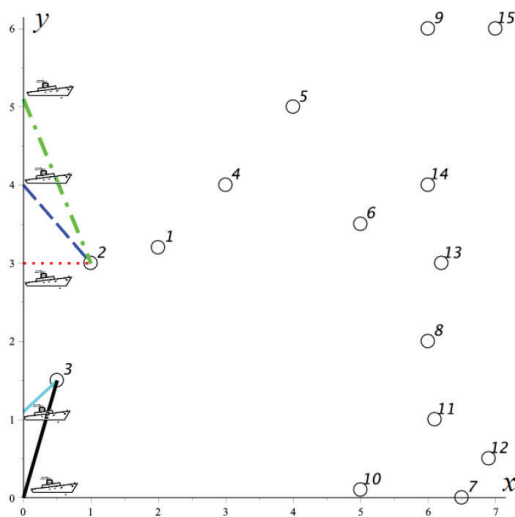


Рис. 1. Начало первого этапа алгоритма I

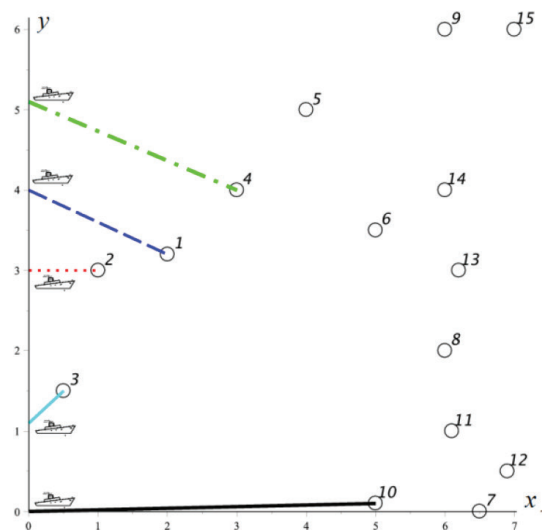


Рис. 2. Конец первого этапа алгоритма I

Алгоритм заканчивает свою работу за N циклов, по два этапа в каждом (рис. 3). Замечена неустойчивость результатов по отношению к вариации координат целей. Так, если немного изменить координату x цели № 7, то маршруты могут измениться значительно (рис. 3 – 5). При $x_7 = 6,1$ оценка эффективности выбранного пути $\Delta_{6,1} = 0,48$ аналогична, при $x_7 = 6,2 \dots 6,4$ имеем $\Delta_{6,2} = 0,44, \Delta_{6,5} = 0,18$. Для выбранной скорости судна это соответствует ожиданию 17 мин и 5 мин. Первоначальные координаты $\eta_{k,1}, k = 1, \dots, m$ агентов здесь выбраны произвольно.

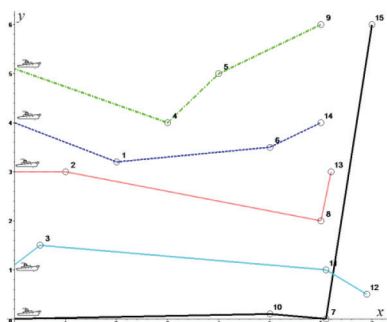


Рис. 3. $x_7 = 6,1$

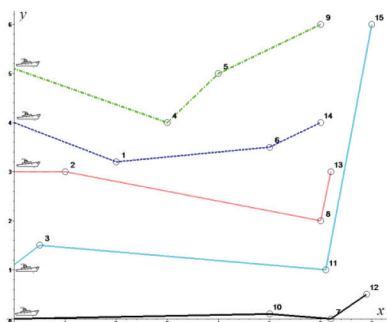


Рис. 4. $x_7 = 6,2$

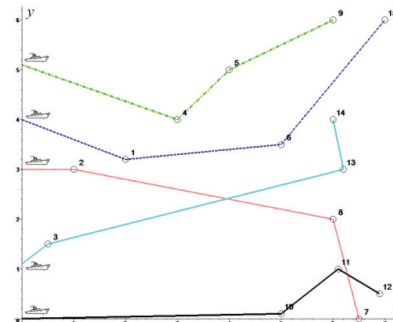


Рис. 5. $x_7 = 6,5$

Отметим, что если число целей и агентов совпадает, то поставленная задача о минимальной суммарной длине маршрутов совпадает с задачей о назначениях и решается с помощью алгоритма Куна (венгерский алгоритм) [26, с. 249]. Более того, в тех случаях, когда в конце первого этапа цели для всех агентов определены, можно применить решение задачи о назначениях. Практический опыт показывает, что это имеет смысл при большом числе агентов. В рассматриваемых примерах уточняющее решение задачи Куна не меняло распределение целей и агентов.

Алгоритм II

Задача о минимальном маршруте решается последовательно для каждого агента. Выбирается произвольный агент и определяется наиболее близкая к нему цель. Затем агент размещается в новом положении, и задача опять повторяется до тех пор, пока агент не пройдет положенные ему N целей. Затем эти цели вычеркиваются из списка целей, и задача решается для другого агента. Очевидно, этот алгоритм относится к локально оптимальным (или «жадным») алгоритмам и имеет тенденцию к попаданию в локальный минимум. Если не прибегать к нейросетевым или генетическим алгоритмам, то единственная возможность избежать попадания в локальный минимум — осуществить полный перебор всех вариантов последовательностей агентов. В рассмотренном примере потребуется перебрать $m! = 120$ вариантов. Одно из решений рассматриваемого примера изображено на рис. 2. Первый агент получил самый короткий путь: цели № 3, 2, 1. Последнему в «очереди» выбора маршрута достался самый длинный путь: цели № 9, 15, 11. Очевидно, это решение не самое оптимальное.

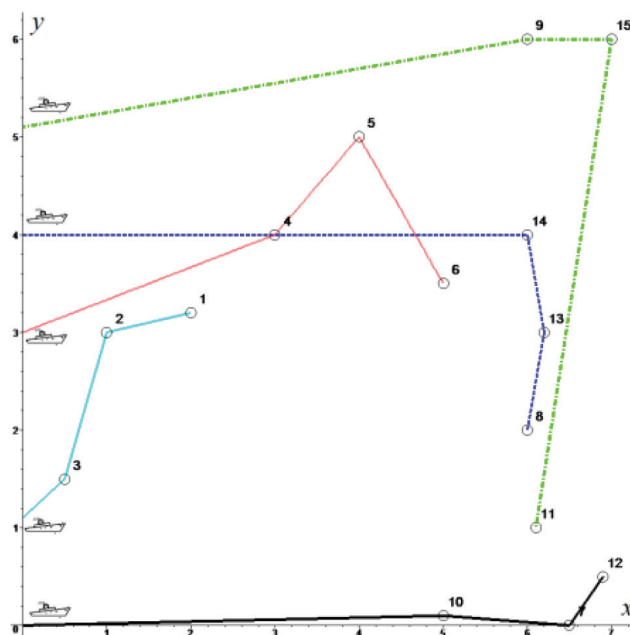


Рис. 6. Работа алгоритма II

Выбор начальных положений агентов

Распределим положения агентов по оси y равномерно вокруг координаты $y_c = \sum_{k=1}^n y_k / n$ центра тяжести точек $x_k, y_k, k = 1, \dots, n : \eta_k = y_0 + \varepsilon(k - (m + 1)/2)$. При нечетном числе агентов они располагаются симметрично (выше и ниже) координаты y_c . Параметр ε характеризует амплитуду разброса. При $\varepsilon = 0$ все агенты сосредоточены в одной точке. Вводя эти данные в программу, можно получить зависимость эффективности выбора маршрутов для ε . Обнаружен характерный минимум этой зависимости как для алгоритма I (рис. 7), так и алгоритма II (рис. 8). Задача решалась для 25 целей, случайно расположенных на плоскости $x - y$ и пяти агентов. Программа написана на языке Maple [27]. Встроенные графические операторы позволили получить анимированную картину последовательности выбора целей и продвижения агентов. Соответствующая программа на языке Maple записана в архив [28] и свободна для скачивания. Время счета по обоим алгоритмам для пяти агентов приблизительно одинаковое, однако алгоритм II, содержащий процедуру перебора $m!$ вариантов при большом числе агентов, может оказаться практически невыполнимым из-за нереально большого времени счета, особенно при построении анимационных иллюстраций процесса.

Заметим, что размах расположения агентов при использовании алгоритма II заметно больше, чем для алгоритма I, а эффективность выбора (минимум кривых на рис. 7 и 8) в обоих случаях приблизительно одинаковая.

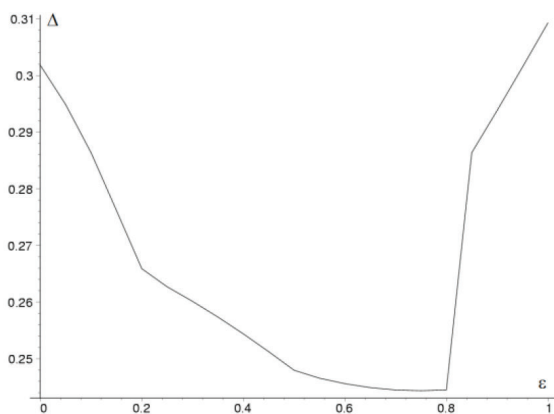


Рис. 7. Алгоритм I. Выбор положений агентов

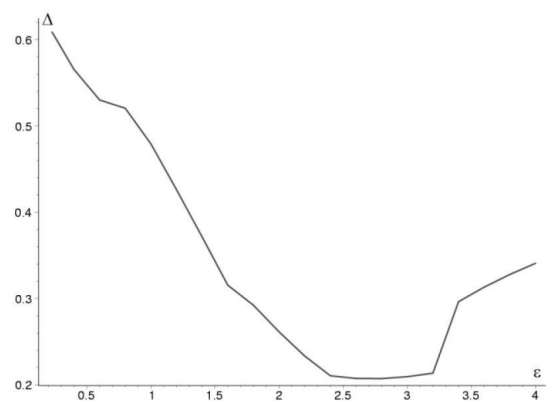


Рис. 8. Алгоритм II. Выбор положений агентов

Выводы

В представленных алгоритмах, с одной стороны, естественным образом содержится задача минимизации пути и координация действий отдельных агентов, имеющих общую цель, в данном случае — покрытия пространства с целевыми точками. С другой стороны, алгоритмы имеют дополнительные управляющие параметры — координаты начальных положений агентов и при необходимости возможность выбора расписания их движения, включая изменение скорости и организации остановок. Эти параметры позволяют решать и другие задачи, в частности здесь решена задача об оптимальном распределении начальных положений агентов. При этом следует оговориться, что алгоритм II приведен только для сравнения и годится как несложный вариант решения задачи при малом числе агентов. Его единственное достоинство — простота программирования и возможность реализации элементарными программными средствами. На основании применения обоих алгоритмов найдена интересная и неочевидная особенность: наличие точки экстремума при выборе амплитуды разноса целей от естественного нулевого положения y_c , выбранного по данным о распределении целей. Алгоритмы легко изменяются для учета времени «обработки» целей, назначения условных ценностей направлений и отдельных целей. Также может быть введен учет изменяющихся внешних условий — течения, направления ветров и т. д. Идеология алгоритмов формальным добавлением третьей координаты по-

зволяет применить их для решения пространственных задач по аналогии, как это выполнено в [21], [22] в задаче о планировании оптимального маршрута подводной лодки с учетом размеров конечных препятствий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00429.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Касьянов В. Н.* Графы в программировании: обработка, визуализация и применение / В. Н. Касьянов, В. А. Евстигнеев. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 1104 с.
2. *Сазонов А. Е.* Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
3. *Gao S.* Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks / S. Gao, H. Huang // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2012. — Vol. 21. — Pp. 196–213.
4. *Fu L.* An adaptive routing algorithm for in-vehicle route guidance systems with real-time information / L. Fu // *Transportation Research Part B: Methodological*. — 2001. — Vol. 35. — № 8. — Pp. 749–765. DOI:10.1016/S0191-2615(00)00019-9.
5. *Castillo O.* Multiple Objective Genetic Algorithms for Path-planning Optimization in Autonomous Mobile Robots / O. Castillo, L. Trujillo, P. Melin // *Soft Computing*. — 2007. — Vol. 11. — № 3. — Pp. 269–279. DOI: 10.1007/s00500-006-0068-4.
6. *Fonseca C. M.* Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization / C. M. Fonseca, C. J. Fleming // *5th international conference genetic algorithms*. — 1993. — Pp. 416–423.
7. *Каляев И. А.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. — М.: Физматлит, 2009. — 280 с.
8. *Каляев И. А.* Управление группой БЛА в задаче формирования строя / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян // *Робототехника и техническая кибернетика*. — 2014. — № 4 (5). — С. 28–39.
9. *Александров В. А.* Коллективный алгоритм выделения операционных подпространств для группы роботов при решении задачи покрытия территории / В. А. Александров, А. И. Кобрин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. — 2011. — № 9. — С. 65–69.
10. *Александров В. А.* Аппаратно-программный комплекс для моделирования задач группового управления мобильными роботами / В. А. Александров, А. И. Кобрин // *Вестник МЭИ*. — 2011. — № 3. — С. 88–95.
11. *Александров В. А.* Исследование алгоритма выделения операционных подпространств при решении задачи покрытия территории группой роботов / В. А. Александров, А. И. Кобрин // *Мат. междунар. молодежной науч.-практ. конф. «Мобильные роботы и мехатронные системы»*. — М.: Изд-во Московского университета, 2011. — С. 19–22.
12. *Александров В. А.* Коллективно-ориентированные мобильные роботы для исследования алгоритмов группового управления / В. А. Александров, К. А. Кирик, А. И. Кобрин // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. — 2014. — № 1. — С. 70–76.
13. *Кобрин А. И.* Программно-аппаратный комплекс для моделирования задач обучения, потоковой обработки сенсорной информации и адаптивного группового управления мобильными роботами / А. И. Кобрин, В. А. Александров, О. Ю. Синявский // *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского*. — 2011. — № 4–5. — С. 2238–2240.
14. *Kuipers B.* A Robot Exploration and Mapping Strategy Based on a Semantic Hierarchy of Spatial Representations / B. Kuipers, Y.-T. Byun // *Robotics and Autonomous Systems*. — 1991. — Vol. 8. — № 1–2. — Pp. 47–63. DOI:10.1016/0921-8890(91)90014-C.
15. *Александров В. А.* Разрешение конфликтных ситуаций в коллективе автономных аппаратов / В. А. Александров, К. А. Кирик, А. И. Кобрин // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. — 2013. — Т. 19. — № 24 (127). — С. 6–10.

16. Александров В. А. Программное обеспечение комплекса аппаратного моделирования алгоритмов группового управления / В. А. Александров, К. А. Кирик, А. И. Кобрин // Trends in Applied Mechanics and Mechatronics. — М.: Инфра-М, 2015. — Т. 1. — С. 66–69.
17. Sinyavskiy O. Y. Construction of adaptive robot control system and robot sensor information processing using spiking neural networks / O. Y. Sinyavskiy, A. I. Kobrin // Proceedings Taiwan-Russian Bilateral Symposium on Problems in Advanced Mechanics. — М.: Moscow State University, 2010. — Pp. 218–227.
18. Breitenmoser A. Voronoi coverage of nonconvex environments with a group of networked robots / A. Breitenmoser, M. Schwager, J. C. Metzger, R. Siegwart, D. Rus // Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. — IEEE, 2010. — Pp. 4982–4989.
19. Шкорупо Д. А. Оптимизация морской транспортной сети в линейном судоходстве / Д. А. Шкорупо, М. В. Волощук // Економічні інновації. — 2012. — № 49. — С. 253–266.
20. Dedkov V. A. The problem of control for multirobot systems / V. A. Dedkov, M. N. Kirsanov // Инновационные информационные технологии. — 2013. — Т. 2. — № 2. — С. 206–213.
21. Hachour O. A Three dimensional Path Planning algorithm / O. Hachour // Proceeding ICS'10. 14th WSEAS international conference on Systems : part of the 14th WSEAS CSCC multiconference. — 2010. — Vol. I. — Pp. 60–65.
22. Kirsanov A. Path planning for the autonomous underwater vehicle / A. Kirsanov, S. Anavatti, T. Ray // Lecture Notes in Computer Science. — 2013. — Vol. 8298. — Part 2. — Pp. 476–486. DOI: 10.1007/978-3-319-03756-1_43.
23. Zeng Z. A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles / Z. Zeng, L. Lian, K. Sammut, F. He, Y. Tang, A. Lammas // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 110. — Part A. — Pp. 303–313. DOI:10.1016/j.oceaneng.2015.10.007.
24. Ataei M. Three-dimensional optimal path planning for waypoint guidance of an autonomous underwater vehicle / M. Ataei, A. Yousefi-Koma // Robotics and Autonomous Systems. — 2015. — Vol. 67. — Pp. 23–32. DOI:10.1016/j.robot.2014.10.007.
25. Alvarez A. Evolutionary path planning for autonomous underwater vehicles in a variable ocean / A. Alvarez, A. Caiti, R. Onken // IEEE Journal of Oceanic Engineering. — 2004. — Vol. 29. — № 2. — Pp. 418–429. DOI: 10.1109/JOE.2004.827837.
26. Асанов М. О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы / М. О. Асанов, В. А. Баранский, В. В. Расин. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 288 с.
27. Голоскоков Д. П. Практический курс математической физики в системе Maple / Д. П. Голоскоков. — СПб.: ПаркКом, 2010. — 644 с.
28. [Архив]. — Режим доступа: <http://vuz.exponenta.ru/Maple-path-animation.rar>

ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR THE SELECTION OF OPTIMAL ROUTES THE GROUP'S VESSELS

The problem of constructing shortest routes for a group of ships that received task of achieving arbitrary targets with known coordinates, located in a confined space is proposed and solved. We considered the case when the number of targets of all courts are the same. The task is completed by the courts when reaching all their goals. It is proposed two algorithm for solving the problem of coordination of the courts with the expectation of a minimum length routes. The efficiency of solving the problems of the choice of routes is estimated by the waiting time of the ship, the last under the objective. The problem of the optimal selection of the initial positions of ships is studied. Numerical experiment detects extreme values of the parameter of the distribution of vessels in the assumption of their uniform distribution on a preselected straight line. The proposed algorithms and the conclusions of their analysis can find application in the movement of sea, air and land transport.

Keywords: route, target, algorithm, path optimization, group management, transport

REFERENCES

1. Kasjanov, V. N., and V. A. Evstigneev. *Grafy v programmirovanii: obrabotka, vizualizacija i primenenie*. SPb.: BHV-Peterburg, 2003.

2. Sazonov, A. E., and V. V. Derjabin. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.
- Gao, S., and H. Huang. "Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 21 (2012): 196–213.
4. Fu, L. "An adaptive routing algorithm for in-vehicle route guidance systems with real-time information." *Transportation Research Part B: Methodological* 35.8 (2001): 749–765. DOI:10.1016/S0191-2615(00)00019-9.
5. Castillo, O., L. Trujillo, and P. Melin. "Multiple Objective Genetic Algorithms for Path-planning Optimization in Autonomous Mobile Robots." *Soft Computing* 11.3 (2007): 269–279. DOI: 10.1007/s00500-006-0068-4.
6. Fonseca, C. M., and C. J. Fleming. "Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization." *5th international conference genetic algorithms* (1993): 416–423.
7. Kaljaev, I. A., A. R. Gajduk, and S. G. Kapustjan. *Modeli i algoritmy kolektivnogo upravlenija v gruppah robotov*. M: Fizmatlit, 2009.
8. Kalyaev, I. A., A. R. Gaiduk, and S. G. Kapustyan. "UAV group control in task of order forming." *Robotics and Technical Cybernetics* 4(5) (2014): 28–39.
9. Alexandrov, V. A., and A. I. Kobrin. "Collective operational environment subspace dividing algorithm for the robotic group in the coverage area problem." *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building* 9 (2011): 65–69.
10. Alexandrov, V. A., and A. I. Kobrin. "The hardware-software complex for modeling of grouped control problems for mobile robots." *MPEI Vestnik* 3 (2011): 88–95.
11. Aleksandrov, V. A., and A. I. Kobrin. "Issledovanie algoritma vydelenija operacionnyh podprostranstv pri reshenii zadachi pokrytija territorii gruppov robotov." *Materialy mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Mobilnye roboty i mehatronnye sistemy»*. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2011: 19–22.
12. Alexandrov, V. A., K. A. Kirik, and A. I. Kobrin. "Collective Tasks Targeted Mobile Robots for Multi-robot Control Algorithms Development." *Russian Internet Journal of Industrial Engineering* 1 (2014): 70–76.
13. Kobrin, A. I., V. A. Aleksandrov, and O. Yu. Sinyavskiy. "Software and hardware system for processing sensor data and adaptive control of mobile robot group." *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod* 4–5 (2011): 2238–2240.
14. Kuipers, B., and Y.-T. Byun. "A Robot Exploration and Mapping Strategy Based on a Semantic Hierarchy of Spatial Representations." *Robotics and Autonomous Systems* 8.1–2 (1991): 47–63. DOI:10.1016/0921-8890(91)90014-C.
15. Alexandrov, V. A., K. A. Kirik, and A. I. Kobrin. "Conflict resolution in the group of autonomous apparatus." *Izvestia VSTU* 19.24(127) (2013): 6–10.
16. Aleksandrov, V. A., K. A. Kirik, and A. I. Kobrin. "Programmnoe obespechenie kompleksa apparatnogo modelirovanija algoritmov gruppovogo upravlenija." *Trends in Applied Mechanics and Mechatronics*. M: Infra-M, 2015. T. 1. 66–69.
17. Sinyavskiy, O. Y., and A. I. Kobrin. "Construction of adaptive robot control system and robot sensor information processing using spiking neural networks." *Proceedings Taiwan-Russian Bilateral Symposium on Problems in Advanced Mechanics*. M.: Moscow State University, 2010: 218–227.
18. Breitenmoser, Andreas, M. Schwager, J. C. Metzger, R. Siegwart, and D. Rus. "Voronoi coverage of non-convex environments with a group of networked robots." *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE, 2010: 4982–4989.
19. Shkorupo, D. A., and M. V. Voloshhuk. "The supply chain optimization problems in the liner network services." *Ekonomichni innovacii* 49 (2012): 253–266.
20. Dedkov, V. A., and M. N. Kirsanov. "The problem of control for multirobot systems." *Innovacionnye informacionnye tehnologii* 2.2 (2013): 206–213.
21. Hachour, O. "A Three dimensional Path Planning algorithm." *Proceeding ICS'10. 14th WSEAS international conference on Systems : part of the 14th WSEAS CSCC multiconference*. 2010. Vol. I. 60–65.
22. Kirsanov, A., S. Anavatti, and T. Ray. "Path planning for the autonomous underwater vehicle." *Lecture Notes in Computer Science* 8298.2 (2013): 476–486. DOI: 10.1007/978-3-319-03756-1_43.
23. Zeng Z., L. Lian, K. Sammut, F. He, Y. Tang, and A. Lammas. "A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles." *Ocean Engineering* 110 (2015): 303–313. DOI:10.1016/j.oceaneng.2015.10.007.

24. Ataei, M., and A. Yousefi-Koma. "Three-dimensional optimal path planning for waypoint guidance of an autonomous underwater vehicle." *Robotics and Autonomous Systems* 67 (2015): 23–32. DOI:10.1016/j.robot.2014.10.007.
25. Alvarez, A., A. Caiti, and R. Onken. "Evolutionary path planning for autonomous underwater vehicles in a variable ocean." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 29.2 (2004): 418–429. DOI: 10.1109/JOE.2004.827837.
26. Asanov, M. O., V. A. Baranskij, and V. V. Rasin. *Diskretnaja matematika: grafy, matroidy, algoritmy*. Izhevsk: NIC "Reguljarnaja i haoticheska ja dinamika", 2001.
27. Goloskokov, D. P. *Prakticheskij kurs matematicheskoj fiziki v sisteme Maple*. SPb.: Izd-vo ParkKom, 2010.
28. Archive. <<http://Vuz.Exponenta.Ru/Maple-Path-Animation.Rar>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Курсанов Михаил Николаевич —
доктор физико-математических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
C216@Ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirsanov Mihail Nikolaevich —
Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor.
MPEI
C216@Ya.ru

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.

УДК 656.621/.626

**И. В. Кукушкин,
А. П. Нырков,
А. А. Нырков**

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КАБОТАЖНЫХ ГРУЗОВ

В данной работе рассмотрено построение имитационной модели процессов переработки каботажных грузов, основанной на генерации подчиненных гамма-распределению случайных величин. Так же, как и имитационная модель, основанная на равномерном распределении данная модель дает приближенные к реальным значения статистических величин, таких как математическое ожидание времени ожидания каботажных судов в очереди и в терминале. Эти величины получаются более достоверными по сравнению с марковской (классической) моделью массового обслуживания, которая дает немного завышенные значения вероятностных характеристик. В рамках данной статьи дана математическая формулировка задачи и предложены основные алгоритмы работы программы. В работе приведены таблицы, позволяющие дать оценку влияния среднеквадратичных отклонений случайных величин на вероятностные характеристики процессов. Алгоритм послужил основой для разработки программы, вычисляющей вероятностные характеристики процессов переработки каботажных грузов.

Ключевые слова: обработка каботажных судов, имитационное моделирование, алгоритмы, гамма-распределение, модель массового обслуживания.

Введение

При моделировании реальных систем и процессов одной из наиболее сложных проблем является адекватность модели соответствующей системе или процессу. Не являются исключением и имитационные модели, для которых входные данные являются случайными величинами [1]. Законы распределения вероятностей входных параметров модели существующего объекта можно получить путем сбора и анализа данных функционирования этого объекта. В этом случае в качестве законов распределения входных параметров модели нередко используют функции эмпири-

ческого распределения. В работах [2] – [4] автором был применен именно такой подход при моделировании процессов перегрузки контейнеров в морских и речных транспортных узлах с целью определения оптимальных режимов их работы. Предпочтительнее все же вместо эмпирических распределений использовать известные теоретические законы распределения, полученные асимптотическим приближением к функциям эмпирического распределения. Такой метод, однако, неприменим к моделируемым системам с целью их проектирования. Также следует отметить, что подбор теоретического распределения на выходе может дать не одно, а два или более законов распределения, каждый из которых удовлетворяет критерию согласия [5]. Например, для непрерывных случайных величин такими законами распределений являются нормальный закон распределения и закон распределения Стьюдента. Поэтому логично применять при моделировании входных параметров различные законы распределения.

В работах [6], [7] исследованы недостатки марковских моделей массового обслуживания, применяемых для моделирования процессов переработки грузов. В них также для создания имитационной модели и проектирования случайных событий предлагается использовать разброс некоторых вероятностных характеристик. Чтобы модель выдавала более достоверные результаты, стохастические параметры модели должны подчиняться законам распределения вероятностей параметров реальных систем. Не всегда это можно выполнить. Однако можно последовательными приближениями, начиная, например, с равномерного или треугольного законов распределения, добиться более качественных результатов работы имитационной модели. Следовательно, подход, используемый в [6], можно улучшить подбором других законов распределения вероятностей параметров модели.

Рассмотрим перевозки каботажных грузов как последовательный ряд повторяющихся операций, в которых каждое отдельное судно везет груз из одного порта в другой, а затем повторяет операцию, возвращаясь в первый порт. Иногда, когда встают вопросы оптимальной загрузки терминала, оценок или выбора оптимального числа причалов, на практике, обычно, начинают использовать детерминированные модели процессов обработки судов. Однако при использовании детерминированных моделей принимаются довольно серьезные, нежелательные допущения, существенно идеализирующие процессы обработки груза. Именно поэтому Б. В. Гнеденко предложил использовать марковские модели массового обслуживания для решения подобных задач.

Постановка задачи

Разработать более достоверную имитационную модель, основываясь на интервальных оценках расчета вероятностных характеристик работы транспортно-технологического терминала. В основу новой модели было положено гамма-распределение вероятностей случайных величин.

Актуальность

Описываемая в статье имитационная модель и алгоритм позволят улучшить качество проектируемых перегрузочных контейнерных терминалов, что, в свою очередь, даст возможность делать более точные поправки в планировании обработки судов и управлении этими процессами.

Математическая формулировка задачи

Рассматриваются два контейнерных терминала, между которыми совершаются каботажные перевозки. Первый терминал включает в себя S_1 причалов для обработки судов, второй — S_2 причалов. Случайную величину — время полного цикла движения одного судна от одного терминала до другого и обратно — будем обозначать $T_{ц}$. Его математическое ожидание находится как сумма математических ожиданий следующих составляющих:

$$\bar{T}_{ц} = \bar{T}_{м1} + \bar{T}_{м2} + \bar{T}_{обр1} + \bar{T}_{обр2} + \bar{T}_{ож1} + \bar{T}_{ож2}. \quad (1)$$

В работе [7] показано, что на время движения судна $\bar{T}_{м1}$ и $\bar{T}_{м2}$ оказывают влияние многие факторы, в особенности гидрометеорологические условия. Это означает, что уже через небольшое количество рейсов временные интервалы между приходами двух судов могут сильно отличаться друг от друга. Это говорит об их стохастичности.

На время обработки судов в порту также оказывают действие различные факторы, влияние которых может сильно изменить ожидаемое значение. Для более адекватного описания процессов переработки каботажных грузов следует использовать не детерминированные, а вероятностные модели [7] – [9]. Основываясь на этих наблюдениях, вводим в модель разброс величин $\bar{T}_{м1}$, $\bar{T}_{м2}$, $\bar{T}_{обр1}$ и $\bar{T}_{обр2}$. Варьируемость новых значений зависит от генерируемых случайных величин, подчиненных гамма-распределению.

Как известно, гамма-распределение имеет ряд особенностей. Так, функция плотности гамма-распределения a -го порядка имеет вид

$$p(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^a x^{a-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(a)}, & x \geq 0. \\ 0, & x < 0, \end{cases}$$

При $a = 1$ гамма-распределение превращается в показательное распределение с $M(X) = \frac{1}{\lambda}$. При целом $a > 1$ гамма-распределение называется *распределением Эрланга a -го порядка*. Распределение Эрланга широко применяется в теории массового обслуживания. Для четного порядка $2a$ с параметром $\lambda = 0,5$ это распределение превращается в χ^2 -распределение с a степенями свободы.

По мере увеличения параметра a график функции плотности гамма-распределения становится похож на график плотности нормального закона, точнее, усеченного нормального закона с некоторой кривизной (коэффициент асимметрии отличен от нуля). Пример функции плотности гамма-распределения с параметром $\lambda = 1$ приведен на рис. 1.

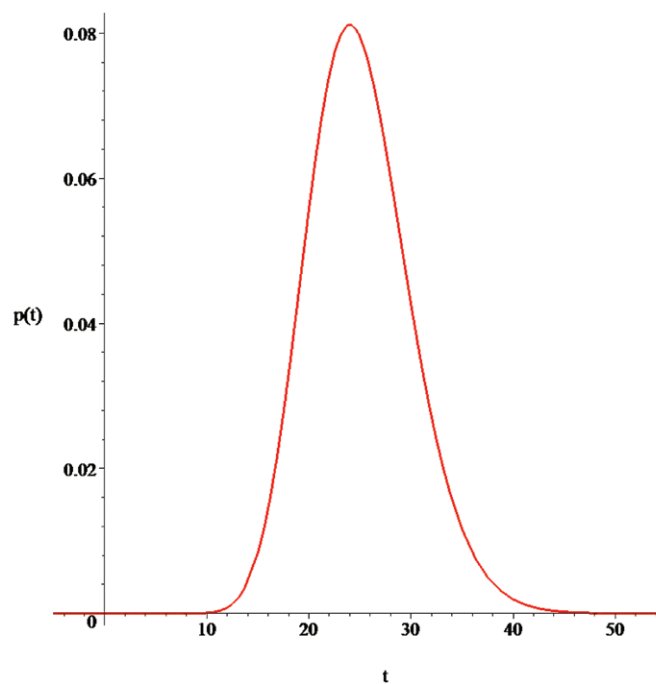


Рис. 1. Функция плотности гамма-распределения с параметром $\lambda = 1$, математическим ожиданием, равным 25, и средним квадратическим отклонением, равным 5

Вероятность того, что $t \in [0; 55]$ практически равна единице. Здесь t — время обработки в порту, выраженное в часах.

Можно утверждать, что практически достоверно изменение этих величин будет находиться в некотором интервале $[c; d]$, длину которого обозначим 6σ [10]. Так, уже начиная с $a = 13$, вероят-

ность попадания в интервал $[M - 6\sigma; M + 6\sigma]$ превосходит 0,95, а с $a = 16$ — более 0,99. Для того чтобы при моделировании оперировать безразмерными величинами, зададим коэффициент

$$r = \frac{\sigma}{M}, \quad (2)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение; M — математическое ожидание.

Так как в имитационной модели генерируются положительные величины, определяющие время движения судов по маршруту и время обработки в портах, то r принимает неотрицательные значения. Как уже было указано, наша модель будет опираться на то, что разница между c и d -границами изменения параметра равна 6σ :

$$d - c = 6\sigma.$$

Из выражения (2) получаем $\sigma = r \cdot M$. Границы изменения c и d выразим через математическое ожидание M и коэффициент r :

$$\begin{cases} M + 3\sigma = d; \\ M - 3\sigma = c. \end{cases} \quad (3)$$

Откуда получаем

$$\begin{cases} d = M(3r + 1); \\ c = M(1 - 3r). \end{cases} \quad (4)$$

Учитывая, что генерируемые величины не могут быть отрицательными, левая граница $c > 0$. Отметим, что если задать значение величины r слишком малым, разброс будет получаться небольшим, в частности, если задать $r = 0$, то мы получим $c = d = M$, что соответствует детерминированным моделям.

Для генерации гамма-распределения при больших значениях a воспользуемся алгоритмом, предложенным И. Г. Аренсом (Ahrens J. H. L.) для $\lambda = 1$ и модернизированным авторами [11].

1. Генерируется равномерно распределенное в $[0; 1]$ число U . Вычисляются значения $Y = \text{tg}(\pi U)$ и $X = Y\sqrt{2a-1} + a - 1$.

2. Если $X \leq 0$, то нужно перейти к шагу 1, иначе генерируется равномерно распределенное в $[0; 1]$ число V .

3. Если $V > (1 + Y^2) e^{((a-1)\ln(X/(a-1)) - Y\sqrt{2a-1})}$, то нужно перейти к шагу 1, иначе вычисленное X — искомое.

Среднее приведенное время ожидания в очереди и среднее приведенное время движения судна между терминалами найдем из соотношений:

$$\bar{\tau}_{\text{ож}} = \frac{\bar{T}_{\text{ож}}}{T_{\text{обр}}}; \quad \bar{\tau}_M = \frac{\bar{T}_M}{T_{\text{обр}}}.$$

На рис. 2 и 3 изображена схема работы алгоритма имитационной модели с учетом разброса случайных величин.

На рис. 2 представлен общий алгоритм работы имитационной модели. Сначала задаются исходные данные, но в отличие от алгоритма, описанного в [6], в данном случае среди задаваемых величин присутствует параметр «method_type», который определяет, какое распределение будет использоваться для разброса случайных величин: равномерное, нормальное или гамма-распределение.

Рис. 3, описывающий процесс генерации гамма-распределенных случайных величин, является вспомогательным для схемы на рис. 1. Значения случайных величин генерируются из интервала $[c; d]$. В этой схеме используется коэффициент r , влияющий на величину границ разброса генерируемых значений.

Для проверки точности реализации алгоритма Аренса были проведены серии генераций, по которым построены гистограммы. Сравнение гистограмм сгенерированных случайных величин с графиком функции плотности гамма-распределения было проведено в математическом пакете Maple.

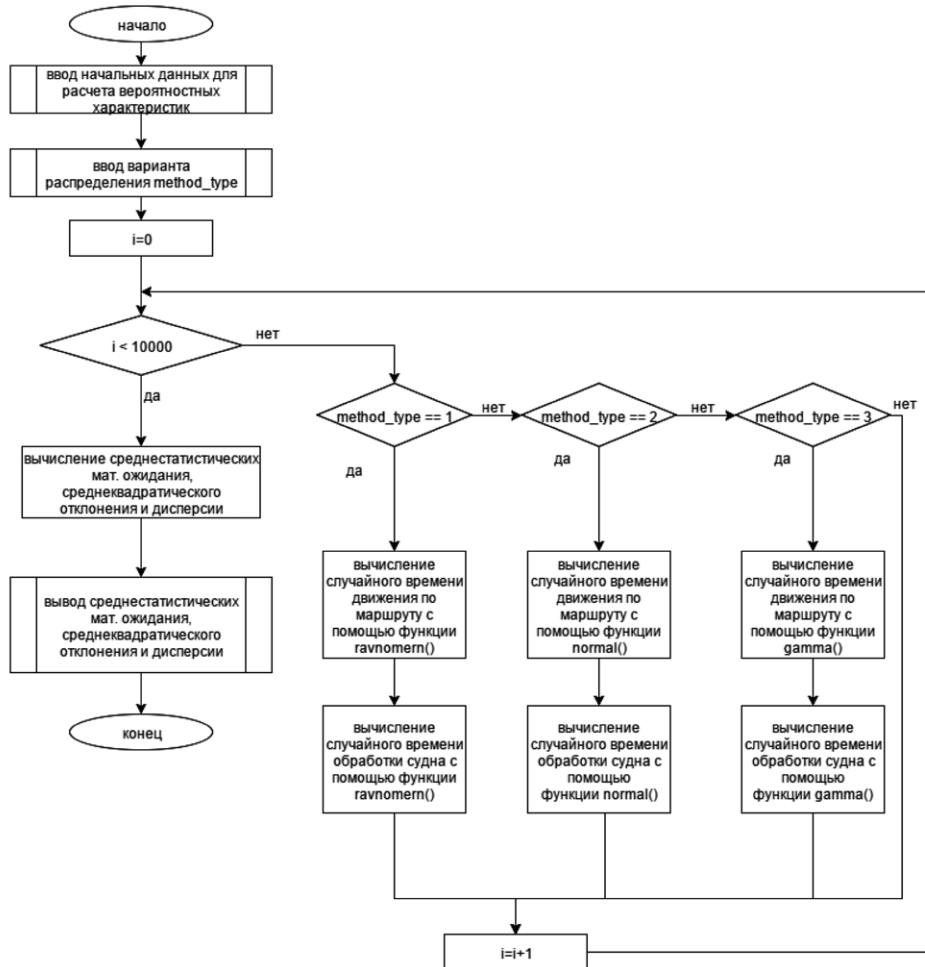


Рис. 2. Алгоритм генерации времени обработки судна

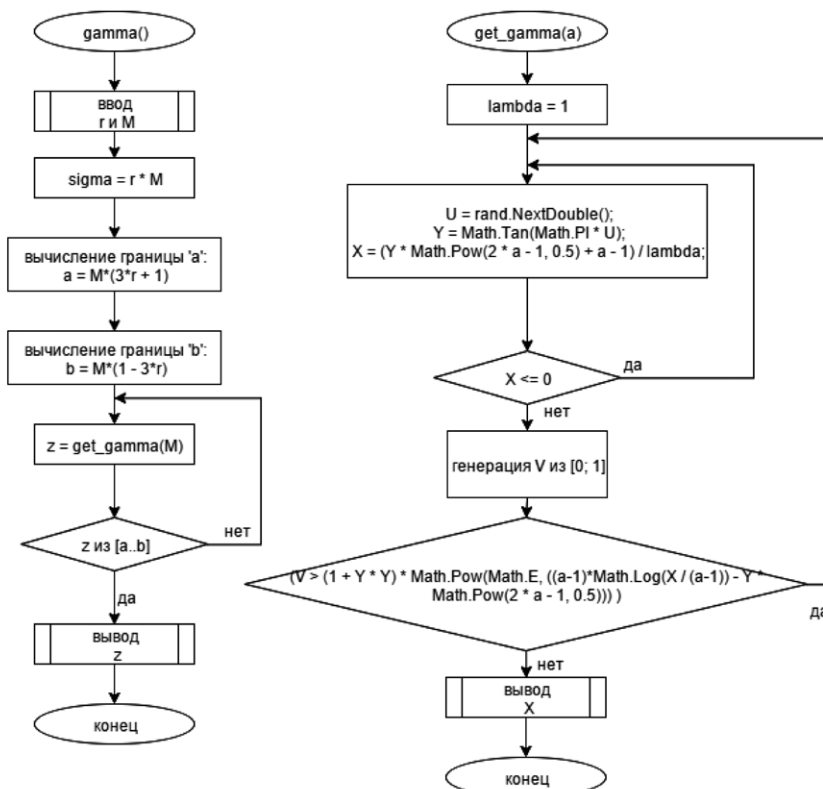


Рис. 3. Генерация гамма-распределенной случайной величины

На рис. 4 – 7 представлены гистограммы выборок объемом 2500 случайных значений для различных значений параметра a гамма-распределения. Как видно из рис. 4 – 7, графики функций плотности гамма-распределения схожи с гистограммами выборок генерируемых величин, построенных на основе алгоритма, описанного ранее. Визуальное сравнение подтверждается критерием согласия Пирсона: значения χ^2 -критерия, вычисленные по выборкам, не превосходят критического значения этого критерия, равного 66,34, с уровнем значимости 0,05:

$$\chi^2 = 28,0 \text{ при } a = 2; \chi^2 = 48,11 \text{ при } a = 3; \chi^2 = 52,19 \text{ при } a = 4; \chi^2 = 39,32 \text{ при } a = 5.$$

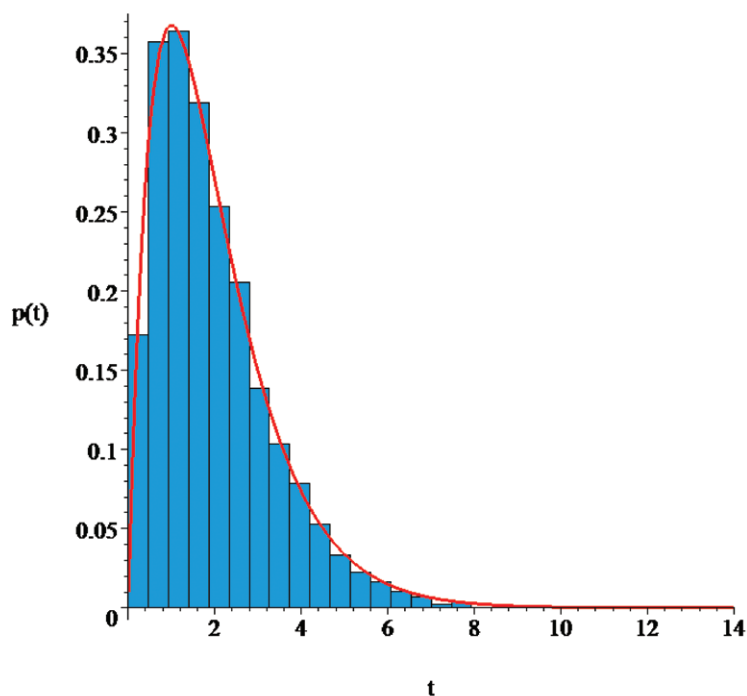


Рис. 4. Гистограмма и функция плотности для математического ожидания, равного двум

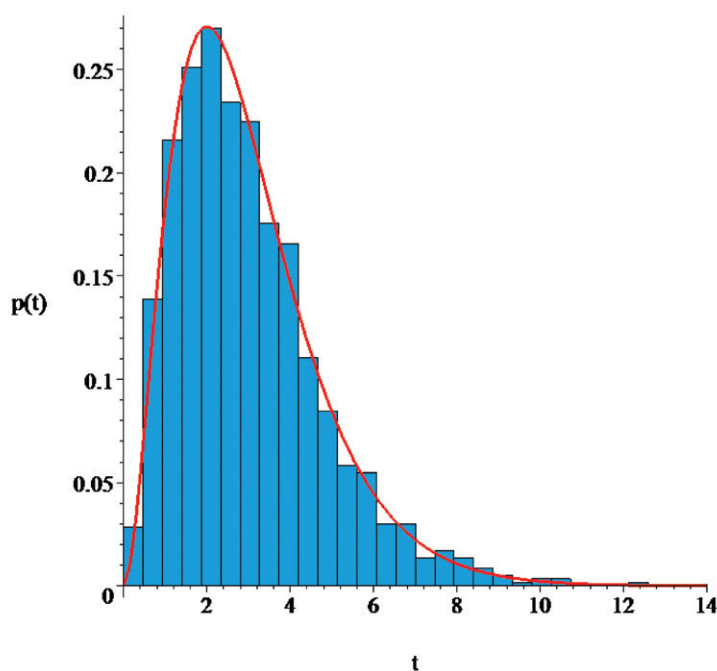


Рис. 5. Гистограмма и функция плотности для математического ожидания, равного трем

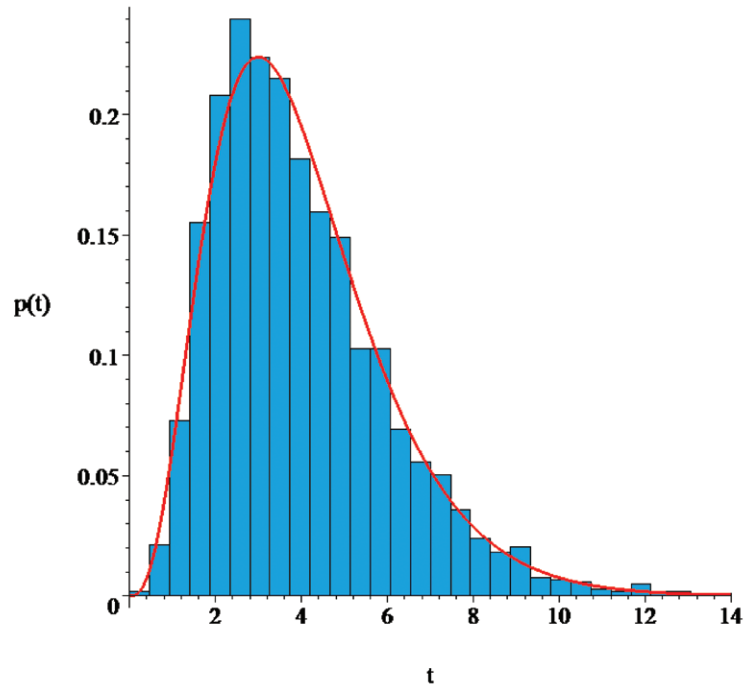


Рис. 6. Гистограмма и функция плотности для математического ожидания, равного четырем

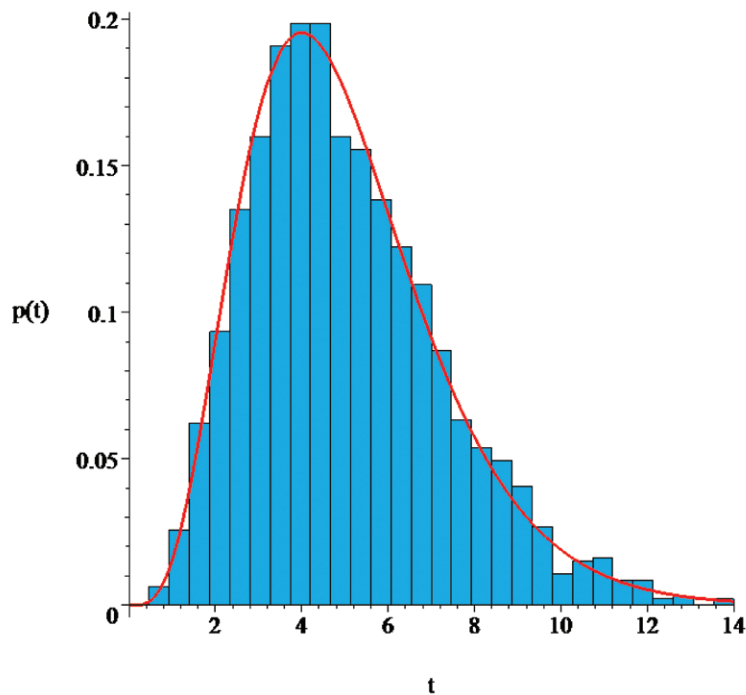


Рис. 7. Гистограмма и функция плотности для математического ожидания, равного пяти

Для оценки влияния величины r на значение среднего приведенного времени ожидания судна в очереди $\bar{\tau}_{\text{ож}}$ была разработана программа [12], реализующая алгоритмы, приведенные на рис. 2 и 3.

На рис. 8 и 9 изображены графики и соответствующие им табл. 1 и 2, в которых представлены зависимости времени ожидания от приведенного среднего времени движения судна по маршруту и величины r . Значения среднего приведенного времени ожидания судна в порту, достига-

емые при $r = 0$, соответствуют детерминированным моделям, а при r_{\max} — марковской модели массового обслуживания [7]. Как видно из графиков и таблиц, с увеличением числа судов m существенно возрастает максимальное значение величины r , которое соответствует марковской модели массового обслуживания.

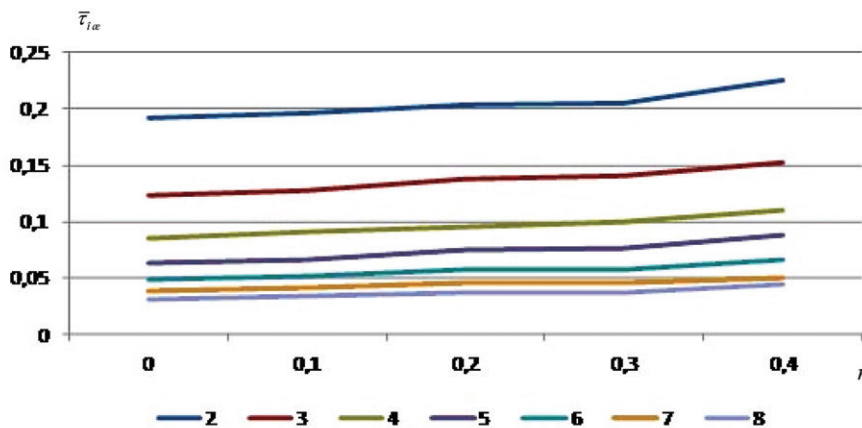


Рис. 8. График зависимости среднего приведенного времени ожидания судна в очереди от r при двух причалах и шести судах для разного времени движения судна по маршруту (от двух до восьми суток)

Таблица 1

Среднее приведенное время ожидания судна в очереди при различных r и времени движения судна по маршруту (от двух до восьми суток) для двух причалов и шести судов

r	$\bar{\tau}_M$						
	2	3	4	5	6	7	8
0	0,19242	0,12325	0,08539	0,06269	0,04803	0,03801	0,03086
0,1	0,19595	0,12779	0,09031	0,06654	0,05131	0,04079	0,03296
0,2	0,20330	0,13772	0,09567	0,07449	0,05689	0,04517	0,03649
0,3	0,20453	0,14104	0,09998	0,07547	0,05709	0,04568	0,03652
0,4	0,22570	0,15245	0,10977	0,08739	0,06531	0,05045	0,04402

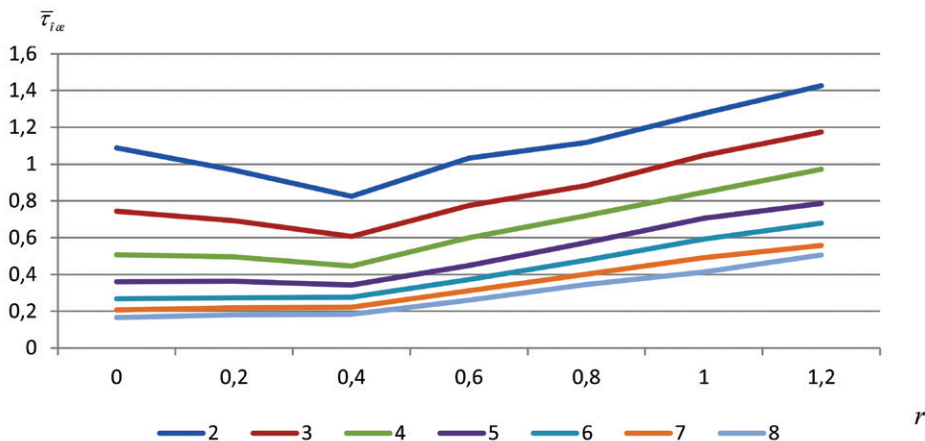


Рис. 9. График зависимости среднего приведенного времени ожидания судна в очереди от r при двух причалах и двенадцати судах, для разного времени движения судна по маршруту (от двух до восьми суток)

Среднее приведенное время ожидания судна в очереди при различных r и времени движения судна по маршруту (от двух до восьми суток) для двух причалов и двенадцати судов

r	$\bar{\tau}_M$						
	2	3	4	5	6	7	8
0	1,08875	0,74304	0,50808	0,36086	0,26817	0,20730	0,16542
0,2	0,96781	0,69249	0,49549	0,36386	0,27307	0,21870	0,18001
0,4	0,82482	0,60648	0,44579	0,34313	0,27593	0,22156	0,18347
0,6	1,03296	0,77476	0,59993	0,44929	0,37153	0,31164	0,25971
0,8	1,11769	0,88435	0,71993	0,57346	0,47851	0,40219	0,34598
1,0	1,27532	1,04793	0,84654	0,70586	0,59145	0,49090	0,41348
1,2	1,42575	1,17377	0,97167	0,78641	0,67894	0,55783	0,50705

В общем случае r_1 и r_2 для разброса значений \bar{T}_M и $\bar{T}_{обр}$ надо брать различными. В данной работе $r_1 = r_2 = r$.

Вывод

Значения приведенного времени ожидания судна в очереди из представленных таблиц начинают практически точно совпадать со значениями марковской модели для $m = 6$ при $r = 0,4$ для любого $\bar{\tau}_M$, а для числа судов $m = 12$ — при $r \in [0,6 - 1,2]$. Для малых значений, например, $\bar{\tau}_M = 2$, даже до $r = 1,2$. Стоит отметить, что с увеличением $\bar{\tau}_M$, максимальное значение разброса r , при котором происходит совпадение с результатами марковской модели, снижается.

Для эксплуатации данной имитационной модели необходимо на основе статистических данных по разбросу величин τ_M и $\tau_{обр}$ определять величины r_1 и r_2 . Это позволит точнее определить вероятностные характеристики процессов переработки каботажных грузов, такие как среднее число судов, находящихся в очереди; среднее число судов, находящихся в терминале; среднее время пребывания судна в очереди и среднее время пребывания судна в терминале.

Применение данной модели позволит обеспечить оптимальное управление каботажными перевозками в транспортно-технологическом комплексе, включающем два терминала. Изучение данного вопроса является перспективным, так как более точные данные могут существенно снизить материальные затраты на каботажные перевозки. Также в будущем на основе полученных результатов этой работы возможно дальнейшее развитие темы и проведение подобных исследований и оценок для системы с большим количеством терминалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоу А. М. Имитационное моделирование / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон. — СПб.: Питер, 2004. — 847 с.
2. Нырков А. П. Математические модели и алгоритмы оптимизации процессов управления перегрузочным комплексом в информационной технологии АСУ (на примере специализированных терминалов речных портов): дис. ... канд. техн. наук / А. П. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 1994. — 193 с.
3. Нырков А. П. Оценка напряженности планов транспортных узлов / А. П. Нырков. — Л.: Изд-во ЛИВТ, 1985. — 24 с.
4. Нырков А. П. Автоматизированное управление и оптимизация технологических процессов в транспортных узлах: дис. ... д-ра техн. наук / А. П. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 2003. — 304 с.
5. Нырков А. П. Теория статистических решений (Статистическая проверка гипотез) / А. П. Нырков, А. А. Нырков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2006. — 60 с.

6. Зубарев Ю. Я. Имитационная модель процессов обработки каботажных судов / Ю. Я. Зубарев, И. В. Кукушкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 186–192.

7. Зубарев Ю. Я. Оптимизация процессов переработки каботажных грузов / Ю. Я. Зубарев, А. М. Тюкавин. — СПб.: Политехника, 2009. — 168 с.

8. Нырков А. П. Автоматизированное управление транспортными системами / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. А. Шнуренко. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 325 с.

9. Нырков А. П. Математическое обеспечение нестандартных задач / А. П. Нырков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 1997. — 46 с.

10. Истомин Е. П. Методы теории вероятностей и математической статистики в моделировании транспортных процессов / Е. П. Истомин, Т. П. Кныш, А. П. Нырков, А. Р. Шкадова. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 1999. — 168 с.

11. Нырков А. А. Имитационное моделирование транспортных процессов / А. А. Нырков, А. П. Нырков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2010. — 112 с.

12. Зубарев Ю. Я. Имитационная модель процессов обработки каботажных судов (ИМПОКС): программа для ЭВМ / Ю. Я. Зубарев, И. В. Кукушкин, А. П. Нырков. — Свидетельство № 2016610037. — Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 января 2016 г.

ALGORITHMS AND SOFTWARE OF SIMULATION MODELING OF THE COASTING SHIPS PROCESSING

This work present a creation simulation of handling processing coasting courts, based on gamma-distribution generation of random variables is considered. As well as the simulation model, which based on uniform distribution, this model will give more exact values of statistical parameters, such as an average of waiting time coasting courts in turn and in the terminal. These characteristics values will be also more exact, in comparison with Markov (classical) model of mass service, which gives a little overestimated values of probabilistic characteristics. Within this article, fundamental algorithms of the program were put and the mathematical formulation of a task is given. Work contains few tables, which allowing to give an assessment of influence of random variables mean square deviations on probabilistic characteristics of processes. The algorithm is a basis for developing computer program, which calculating probabilistic characteristics of coasting freights handling.

Keywords: coasting ships handling, simulation modeling, algorithms, gamma-distribution, queueing model.

REFERENCES

1. Lou, A. M., and V. D. Kelton. *Imitacionnoe modelirovanie*. SPb.: Piter, 2004.
2. Nyrkov, A. P. *Matematicheskie modeli i algoritmy optimizacii processov upravlenija peregruzochnym kompleksom v informacionnoj tehnologii ASU (na primere specializirovannyh terminalov rechnyh portov)*: Ph.D. Diss. (Tech.). SPb.: SPGUVK, 1994.
3. Nyrkov, A. P. *Ocenka naprjazhennosti planov transportnyh uzlov*. L.: LIVT, 1985.
4. Nyrkov, A. P. *Avtomatizirovannoe upravlenie i optimizacija tehnologicheskikh processov v transportnyh uzlah*: Dr. Diss. (Tech.). SPb.: SPGUVK, 2003.
5. Nyrkov, A. P., and A. A. Nyrkov. *Teorija statisticheskikh reshenij (Statisticheskaja proverka gipotez)*. SPb.: SPGUVK, 2006.
6. Zubarev, Y. J., and I. V. Kukushkin. "Imitation model of the coasting ships processing." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 186–192.
7. Zubarev, Y. J., and A. M. Tukavin. *Optimizacija processov pererabotki kabotazhnyh грузов*. SPb.: Politehnika, 2009.
8. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. A. Shnurenko. *Avtomatizirovannoe upravlenie transportnymi sistemami*. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2013.
9. Nyrkov, A. P. *Matematicheskoe obespechenie nestandartnyh zadach*. SPb.: SPGUVK, 1997.
10. Istomin, E. P., T. P. Knysh, A. P. Nyrkov, and A. R. Shkadova. *Metody teorii veroyatnostej i matematicheskoi statistiki v modelirovanii transportnyh processov*. SPb.: SPGUVK, 1999.

11. Nyrkov, A. A., and A. P. Nyrkov. *Imitacionnoe modelirovanie transportnyh processov*. SPb.: SPGUVK, 2010.

12. Zubarev, Ju. Ja., I. V. Kukushkin, and A. P. Nyrkov. *Imitacionnaja model processov obrabotki kabotazhnyh sudov (IMPOKS): computer program*. Certificate № 2016610037. 11 Jan. 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кукушкин Иван Викторович — аспирант.
Научный руководитель:
Ныркoв Анатолий Павлович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
Iron-win@mail.ru
Ныркoв Анатолий Павлович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
kaf.koib@gmail.com, kaf_koib@gumrf.ru
Ныркoв Андрей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
kaf.koib@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kukushkin Ivan Viktorovich — Postgraduate.
Supervisor:
Nyrkov Anatoliy Pavlovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Iron-win@mail.ru
Nyrkov Anatoliy Pavlovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf.koib@gmail.com, kaf_koib@gumrf.ru
Nyrkov Andrey Anatolievich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf.koib@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.

УДК 658.562(100)(075.8)

А. А. Вардомская

ГИБРИДНАЯ НЕЙРОННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА КАК ЗВЕНА ПОРТОВОГО ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрена модель двухзвеного манипулятора, построенная на основе гибридной нейронной сети с использованием блоков ANFIS для решения инверсной кинематической задачи обеспечения движения рабочего элемента по заданной траектории. Двухзвенные манипуляторы широко используются в перегрузочном оборудовании, которым оснащены современные порты и транспортные терминалы. Показано, что применение элементов гибридных сетей с простыми способами обучения и настройки позволяет значительно повысить эффективность и качество функционирования манипуляторов путем использования решений, основанных на фундаментальных положениях теории систем искусственного интеллекта. Для задания траекторий движения спредера применены сплайны. Приведены уравнения динамики модели двухзвеного манипулятора, позволяющие выполнять оценки допустимых нагрузок элементов конструкции и обеспечивать безаварийные режимы функционирования манипулятора.

Ключевые слова: манипулятор, модель, гибридная сеть, обучающая выборка, искусственный интеллект, сплайн, инверсная кинематическая задача, траектория движения

В ПОСЛЕДНЕЕ время проявляется большой интерес к системам искусственного интеллекта, которые находят все большее применение в различных сферах человеческой деятельности [1]. Высокая размерность моделей технологических процессов, сложность их математической формализации при наличии нестационарных нелинейных связей в системах, дополняемых комплексом логических переходов и параметрических ограничений, определяет необходимость обращения к технологиям построения систем искусственного интеллекта как наи-

более приемлемым для решения задач высокой сложности [2]. Широкое распространение системы искусственного интеллекта находят в технических, экономических, экологических и социальных системах, в медицине, а также на водном транспорте в различных приложениях [3].

Для построения систем искусственного интеллекта, как правило, используются нейронные сети и инструментарий фаззи-систем с применением генетических алгоритмов [4]. На водном транспорте нейронные сети используются для решения навигационных задач различной сложности, прогнозирования траекторий движения судна, построения предиктивных систем управления [5]. Математическая теория размытых и нечетких множеств и инструментарий фаззи-систем применяются для принятия решений в случаях нечеткого вывода, построения адаптивных регуляторов, анализа и синтеза гибридных сетей и систем.

Гибридные сети наиболее адаптированы к различным способам, условиям и технологиям построения сложных моделей функционирования объектов, и, по сути, являются тем инструментом, который обеспечивает достижение целей моделирования простыми способами [6]. Практика применения нейронных и фаззи-систем показала, что каждой из них в отдельности присущи определенные недостатки [7]. Например, нейронные сети эффективны при распознавании образов, но определить путь решения задачи, если число нейронов и их слоев велико, на практике невозможно [8]. Трудности возникают при выборе способа обучения, реализации процедур переобучения и др. В системах с нечеткой логикой можно в определенных случаях восстановить алгоритм достижения цели, однако вектор переменных состояния в таких системах не может иметь большую размерность, поскольку требуется разделять универсальное множество на отдельные подмножества [2]. В гибридных системах выбранные функции принадлежности встраиваются в систему на базе алгоритмов обучения нейронных сетей, а выводы формируются с помощью аппарата нечеткой логики [9]. В таких системах эффективно используется априорная информация для получения новых «знаний» и упрощаются процедуры моделирования проектируемых систем принятия решений. Гибридная сеть представляет собой симбиоз нейронной сети с четкими сигналами, функцией активизации и весами, где сигналы и веса используются с оценками треугольных норм: T -нормы, T -конормы. Входы и выходы гибридной сети должны быть вещественными числами, изменяющимися на интервале $[0,1]$.

Гибридные сети могут успешно применяться для создания моделей и алгоритмов управления механизмами и устройствами портового перегрузочного оборудования, приводами промышленных роботов, манипуляторов; группового управления мобильными перегрузочными средствами и терминалами [10].

Далее приводятся модель и алгоритм реализации заданной траектории движения двухзвенного манипулятора на основе гибридной сети. Манипулятор представляет собой двухзвенный механизм с шарнирными соединениями (рис. 1). Траектория перемещения звеньев манипулятора определяется углами поворота приводов α_1 и α_2 в шарнирных соединениях. На рис. 1 введены вспомогательные углы Q_1 и Q_2 , длины звеньев манипулятора обозначены, соответственно, символами L_1 и L_2 . Положение «пяты» первого звена на плоскости обозначено точкой (x_0, y_0) . Видно, что координаты колена (x_1, y_1) , а спредер, расположенный от начала координат на расстоянии R , находится в точке с координатами (x, y) .

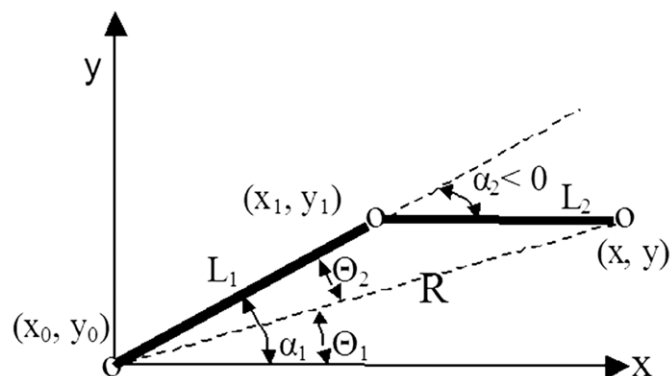


Рис. 1. Схема манипулятора

С помощью гибридной модели решается инверсная задача реализации заданной траектории движения спредера путем оценки углов поворота звеньев манипулятора. Модель основана на применении архитектуры адаптивной нечеткой сети класса *anfis*. Управление манипулятором состоит в установлении таких углов поворота механизмов в шарнирных соединениях, при которых обеспечивается движение спредера по заданной траектории. Для построения модели искусственного интеллекта, предназначенной для решения инверсной кинематической задачи, основанной на использовании гибридной сети, воспользуемся следующими соотношениями, устанавливающими связь между положением спредера и углами поворота механизмов приводов в «пяте» и колене манипулятора. С учетом обозначений, введенных на рис. 1, получим

$$\cos \alpha_2 = \frac{R^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}. \quad (1)$$

Используя x и y как координаты спредера манипулятора, запишем:

$$\Theta_1 = \arctg(y/x);$$

$$R^2 + L_1^2 - 2RL_1 \cos \Theta_2 = L_2^2 \text{ или } \cos \Theta_2 = \frac{R^2 + L_1^2 - L_2^2}{2RL_1}. \quad (2)$$

Из рис. 1 также следует, что должны соблюдаться условия

$$\alpha_1 = \Theta_1 - \Theta_2, \text{ если } \alpha_2 > 0 \text{ или } \alpha_1 = \Theta_1 + \Theta_2, \text{ если } \alpha_2 < 0. \quad (3)$$

Если $L_1 > L_2$, то нетрудно оценить минимальное и максимальное значения R для углов поворота α_1 и α_2 , изменяющихся в допустимых границах. С другой стороны, углы α_2 и Θ_2 являются нелинейными функциями только аргумента R , поскольку

$$\alpha_2 = \arccos((R^2 - L_1^2 - L_2^2)/(2L_1 \cdot L_2)) \quad (4)$$

и

$$\Theta_2 = \arccos((R^2 + L_1^2 - L_2^2)/(2L_1 \cdot R)). \quad (5)$$

Если теперь сгенерировать значения в выражениях (4) и (5) для изменяющихся величин R в диапазоне $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$ с шагом d , то можно получить массивы чисел для построения адаптивной системы нейро-нечеткого вывода *anfis*-инструментария, содержащегося в приложении Fuzzy Logic Toolbox вычислительной среды MatLAB. Он предназначен для настройки системы логического вывода типа Sugenо. Сформированные массивы чисел удобно также использовать для обучения *anfis*. В процессе обучения устанавливаются параметры системы нечеткого логического вывода (параметры функций принадлежности), обеспечивающие минимум погрешности аппроксимации расчетных (экспериментальных) данных, представленных в обучающей выборке. В работе используется следующий синтаксис функции:

$$[\text{fis}, \text{error}] = \text{anfis}([\text{матрица «радиус_угол»}], [\text{идентификатор с опциями}], [\text{число циклов обучения}]), \quad (6)$$

где аргументами являются: идентификатор обучающей выборки [матрица «радиус_угол»], исходная система нечеткого логического вывода типа Sugenо нулевого порядка [идентификатор с опциями], вектор параметров настройки [число циклов обучения] с данными о количестве проводимых циклов обучений (эпох).

В принятой модели используются два выхода: структура *fis*, применяемая для моделирования при поступлении на вход текущих значений (x, y) , расположенных на заданной траектории движения спредера, и ошибка моделирования *error* угла поворота соответствующего звена манипулятора. Далее приведен фрагмент программы в кодах MatLAB для создания моделей *fis* и *fis1*, аппроксимирующих углы α_2 и W_2 , согласно соотношениям (4) и (5). Поскольку $L_1 = 4$ и $L_2 = 3$, то $R_{\min} = 1$ и $R_{\max} = 7$. Выбран шаг дискретности $d = 0,01$. Подготовка данных для обучения сети выполнена с помощью функции *genfis1*, генерирующей структуру системы нечеткого вывода типа Sugenо. Функция является исходной для последующего обучения гибридной системы с соответ-

ствующими параметрами настройки, где с помощью `gbellmf` введена функция принадлежности обобщенного колоколообразного типа.

1. `R=(1:0.01:7)';`
2. `L1=4; L2=3;`
3. `d=sign((R.^2-L1^2-L2^2)/(2*L1*L2));`
4. `alf2=acos((R.^2-L1^2-L2^2)/(2*L1*L2));`
5. `epoch_n=20;`
6. `in_fis1= genfis1([R alf2],150,'gbellmf');`
7. `[fis,error]=anfis([R alf2],in_fis1,epoch_n)`
8. `Ym=evalfis(R,fis);`
9. `[Ym alf2]`
10. `tet2=acos((R.^2+L1^2-L2^2)/(2*L1*R));`
11. `epoch_n=20;`
12. `in_fis2= genfis1([R tet2],150,'gbellmf');`
13. `[fis1,error1]=anfis([R tet2],in_fis2,epoch_n)`
14. `Y1m=evalfis(R,fis1);`
15. `[Y1m tet2]`
16. % Наименования вычислительных блоков гибридной сети:
17. `ANFIS_1=fis; ANFIS_2=fis1;`

Выбранные параметры настройки модели сети и матрица «радиус_угол» размерности (601×2) для обучения `anfis` с числом циклов `epoch_n=20` позволили получить требуемую точность аппроксимации обучающей выборки, возвращаемой функцией `evalfis`. Погрешность аппроксимации можно оценить по графикам, приведенным на рис. 2.

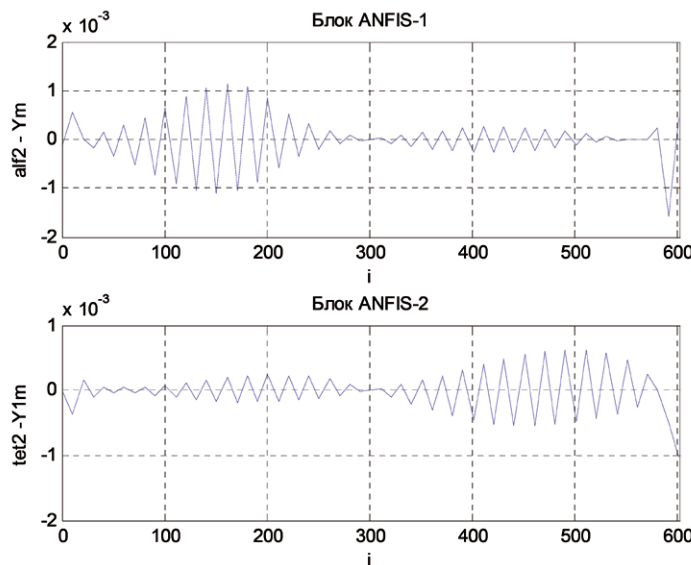


Рис. 2. Ошибка при моделировании обучающей выборки блоками системы ANFIS_1 и ANFIS_2

Время обучения блоков `anfis` применительно к рассматриваемой модели двухзвенного манипулятора зависит, главным образом, от размерности выборки и числа эпох обучения и может составлять при моделировании на ноутбуке, например, отвечающем спецификации PC99A, несколько десятков секунд, что вполне допустимо. Будучи однажды сформированными и настроенными, эти блоки должны использоваться для генерирования углов α_2 и Θ_2 для любых матриц «радиус_угол», элементы которых принадлежат множеству выборки обучения.

Управление манипулятором осуществляется с помощью блоков ANFIS_1 и ANFIS_2, предназначенных для расчета углов поворота, соответственно, α_2 и Θ_2 , после чего, с учетом условия (3),

находится угол α_1 . Входными переменными блоков являются координаты точек траектории, на которой должен располагаться спредер (рабочий элемент манипулятора).

Предположим, что траектория спредера манипулятора должна проходить через точки с координатами

$$(xy)^T = \begin{bmatrix} 6.00 & 3.25 & 0.50 & -2.25 & -5.00 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}.$$

Для этих точек определим вектор RPe R: $RP = [6.0000 \ 3.4004 \ 2.0616 \ 3.7500 \ 6.4031]$.

Используя блоки ANFIS_1 и ANFIS_2 и функцию преобразования evalfis, получим решение инверсной кинематической задачи, представленное ниже фрагментом программы в кодах MatLAB:

```
RP = sqrt(xy(2,:).^2+xy(1,:).^2);
S1 = evalfis(RP,ANFIS_1)
S2 = evalfis(RP,ANFIS_2)
% Выполнение условия (3) с учетом знака a2:
tetP = atan2(xy(2,:),xy(1,:));
if S1<0
alf1P = tetP+S2';
else
alf1P = tetP-S2';
end
% Углы (в градусах):
Tet = tetP*180/pi; Alf1P = alf1*180/pi; Alf2P = [S1*180/pi]';
```

В результате вычислений для выборки, представленной матрицей $(xy)^T$ имеем:

```
Wp = Tet = [0 17.1027 75.9638 126.8699 141.3402],
a1P = Alf1P = [-26.4119 -29.8551 28.9684 81.4442 120.8664],
a2P = Alf2P = [62.7273 124.0286 149.8803 117.1379 48.1923].
```

Построение положения звеньев манипулятора на плоскости выполнено в расчетных точках траектории, полученных с помощью сплайна [11], проходящего через узлы интерполяции с координатами $(xy)^T$. По сплайну путем деления траектории на 50 равных шагов определены координаты спредера в процессе движения, выделенные в виде массива точек. Согласно модели, с помощью блоков ANFIS_1 и ANFIS_2 получены углы поворота звеньев, по которым фиксированы положения звеньев манипулятора в каждой точке траектории. На рис. 3 выполнены графические построения положения звеньев, где выделены звенья при расположении рабочего элемента в точках (1–5) утолщенными линиями.

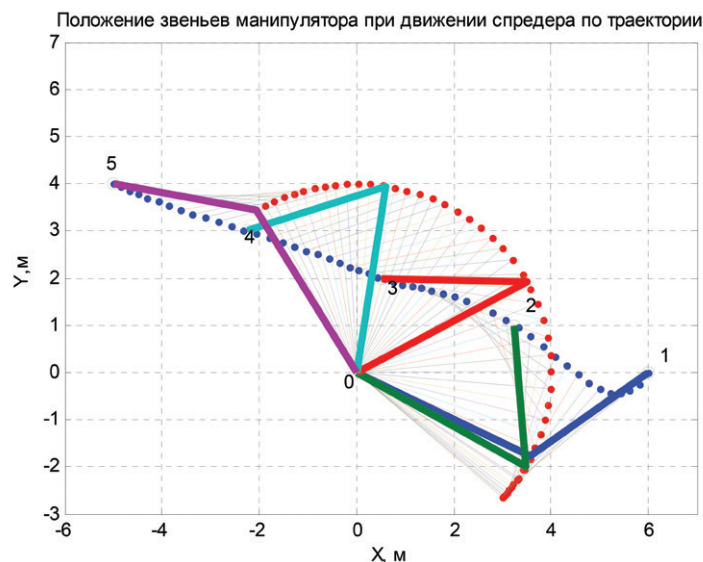


Рис. 3. Положение звеньев манипулятора при движении спредера по траектории

Сплаины целесообразно использовать для управления перемещением спредера по заданной траектории во времени [12]. Важно обеспечить такие режимы движения, которые соответствуют нормальным (допустимым) нагрузкам на элементы конструкции с учетом динамики и безопасности функционирования. Модель динамики манипулятора в стандартной форме можно представить матричным уравнением [13]:

$$M(q)\cdot\dot{q} + V(q, \dot{q}) + P(q) = H, \quad (7)$$

где $M(q)$ — инерционная матрица; $V(q, \dot{q})$ — вектор, учитывающий ускорения при поступательном и вращательном движении; $P(q)$ — вектор гравитационных составляющих системы; H — вектор моментов, приложенных в механизмах приводов звеньев; q — вектор переменных состояния.

Если предположить, что массы звеньев манипулятора m_1 и m_2 сосредоточены на концах звеньев (в спредере и колене соответственно), а вектор $q = [a_1 \ a_2]^T$, то нелинейное уравнение (7) можно записать в терминах конструктивных параметров манипулятора. При этом аддитивные составляющие (7) вычисляются с помощью аналитических зависимостей

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где

$$M_{11} = (m_1 + m_2) \cdot L_{12} + m_2 \cdot L_{22} + 2m_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \cos\alpha_2;$$

$$M_{22} = m_2 \cdot L_{22};$$

$$M_{12} = M_{21} = m_2 \cdot L_{22} + m_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \cos\alpha_2;$$

$$V(q, \dot{q}) = [-m_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot (2 \frac{da_1}{dt} \cdot \frac{da_2}{dt} + (\frac{da_2}{dt})^2) \cdot \sin\alpha_2; m_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \sin\alpha_2]; \quad (9)$$

$$P(q) = [(m_1 + m_2) \cdot g \cdot L_1 \cdot \cos\alpha_1 + m_2 \cdot g \cdot L_2 \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2); m_2 \cdot g \cdot L_2 \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2)]; \quad (10)$$

$$H = [h_1 \ h_2]^T. \quad (11).$$

Интегрирование уравнений (7) – (11) следует производить только численными методами после их приведения к форме пространства состояний с использованием матрицы Якоби. Моделирование показало, что динамические процессы при повышении быстродействия системы могут существенно влиять на напряженное состояние элементов конструкции и их целесообразно использовать для введения ограничений в широком диапазоне вариации рабочих параметров и скоростных режимов. Большое разнообразие выбираемых траекторий и цикловых диаграмм с различными режимами работы приводов (с заданием траекторий, соответствующих максимальному быстродействию, циклограмм трапецеидальной формы и др.) требуют оперативного решения вопросов настройки и реализации режимов движения рабочего органа. При этом блоки ANFIS_1 и ANFIS_2 в модели играют роль инструмента, обеспечивающего решение проблемы на качественно новом уровне.

Таким образом, нейронная модель двухзвенного манипулятора позволяет при должном научном обосновании с требуемой для практики точностью построить траекторию движения спредера, определить скорости и ускорения всех элементов манипулятора в любой точке траектории.

Применение модели, обеспечивающей высокую точность аппроксимации траекторных процессов в нелинейной динамической системе (манипуляторе), дает возможность повысить безопасность работы портового перегрузочного оборудования за счет ограничений моментов и сил, возникающих в механизмах приводов звеньев в случаях повышения быстродействия манипулятора. Создание гибридной модели с использованием оператора ANFIS способствует существенному упрощению конструкции механизмов манипулятора и заданию режимов работы с помощью функции, широко используемой в современных интеллектуальных системах управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясницкий Л. Н. Искусственный интеллект и новые возможности компьютерного моделирования / Л. Н. Ясницкий // Вестник Пермского университета. Серия: Информационные системы и технологии. — 2005. — № 4. — С. 81–86.
2. Еремин Д. М. Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления / Д. М. Еремин, И. Б. Гарцев. — М.: МИРЭА, 2004. — 75 с.
3. Ярушклина Н. Г. Современный интеллектуальный анализ нечетких временных рядов / Н. Г. Ярушклина // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. V-я Междунар. науч.-практ. конф. — 2007. — С. 19–29.
4. Чернодуб А. Н. Обзор методов нейроуправления / А. Н. Чернодуб, Д. А. Дзюба // Проблемы программирования. — 2011. — № 2. — С. 79–94.
5. Шмыков В. Г. Моделирование и автоматизация технологических процессов на водных путях / В. Г. Шмыков, В. В. Сахаров, С. В. Сабуров. — Котлас: Изд-во филиала «Дом печати – ВЯТКА», 2015. — 192 с.
6. Терехов В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин. — М.: Высшая школа, 2002. — 184 с.
7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2006. — 1104 с.
8. Калацкая Л. В. Организация и обучение искусственных нейронных сетей: экспериментальное учеб. пособие / Л. В. Калацкая, В. А. Новиков, В. С. Садов. — Минск: Изд-во БГУ, 2003. — 72 с.
9. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. — М.: Физматлит, 2001. — 224 с.
10. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MATLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.
11. Сахаров В. В. Слайн — метод экономичного управления расходом топлива на речных судах / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков [и др.] // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 3(68). — С. 62–65.
12. Хакимов Б. Б. Моделирование корреляционных зависимостей сплайнами на примерах в геологии и экологии / Б. Б. Хакимов. — М.: Изд-во МГУ, 2003. — 141 с.
13. Андрианов Е. Н. Модальный метод параметрического демпфирования динамической системы / Е. Н. Андрианов, В. В. Сахаров, А. Г. Таранин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 56а–66.

TWO – LINK MANIPULATOR HYBRID NEURAL MODEL AS A PART OF PORT CARGO HANDLING EQUIPMENT

Two-link manipulator model that constructed on hybrid neural net with ANFIS blocks is considered. Blocs ANFIS intends for kinematic inverse to problem that insure working element moving on setting trajectory. Two-link manipulators are widely used in the reloading equipment in modern ports and transportation terminals. It is shown that implement hybrid net elements with a simple manner turn permits considerable to increase efficiency and quality of function manipulators with solution use based on fundamental theoretical artificial intellect systems states. Splines implements manipulator trajectory move. Model dynamic equations for two – link manipulator are considered. Model permits to estimate allow loads for ensure safety manipulator regimes.

Key words: manipulator, model, hybrid net, training selection, artificial intellect, spline, inverse kinematic task, moving trajectory.

REFERENCES

1. Jasnickyj, L. N. “Iskusstvennyj intellekt i novye vozmozhnosti komp’juternogo modelirovaniya.” *Vestnik Permskogo universiteta. Serija: Informacionnye sistemy i tehnologii* 4 (2005): 81–86.
2. Eremin, D. M., and I. B. Garceev. *Iskusstvennye nejronnye seti v intellektual’nyh sistemah upravlenija*. M.: MIRJeA, 2004.

3. Jarushkina, N. G. "Sovremennyj intellektual'nyj analiz nechetkih vremennyh rjadov." *Integrirovannye modeli i mjagkie vychislenija v iskusstvennom intellekte. V Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija*. 2007: 19–29.
4. Chernodub, A. N., and D. A. Dzjuba. "Obzor metodov nejroupravlenija." *Problemy programmirovanija* 2 (2011): 79–94.
5. Shmykov, V. G., V. V. Saharov, and S. V. Saburov. *Modelirovanie i avtomatizacija tehnologicheskikh processov na vodnyh putjah*. Kotlas.:Izd. filial «Dom pečati – VJaTKA», 2015.
6. Terehov, V. A., D. V. Efimov, and I. Ju. Tjukin. *Nejrosetevye sistemy upravlenija*. M.: Vysshaja shkola, 2002.
7. Hajkin, S. *Nejronnye seti: polnyj kurs (Neural Networks: A Comprehensive Foundation)*. 2 izd. M.: Viljams, 2006.
8. Kalackaja, L. V., V. A. Novikov, and V. S. Sadov. *Organizacija i obuchenie iskusstvennyh nejronnyh setej: Jeksperimental'noe ucheb. posobie*. Minsk: Izd-vo BGU, 2003.
9. Kruglov, V. V., M. I. Dli, and R. Ju. Golunov. *Nechetskaja logika i iskusstvennye nejronnye seti*. M.: Fizmatlit, 2001.
10. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizacii tehnologicheskikh processov na obektah vodnogo transporta v srede MATLAB: monografija*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015.
11. Saharov, V. V., A. A. Kuz'min, A. A. Chertkov, and D. S. Tormashev. "The spline-method of fuel consumption economical control on river ships." *River transport (XXIst century)* 3(68) (2014): 62–65.
12. Hakimov, B. B. *Modelirovanie korrelycionnyh zavisimostej splajnami na primerah v geologii i jekologii*. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2003.
13. Andrianov, E. N., V. V. Saharov, and A. G. Taranin. "Modally damped parametric method for ship constructions." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 4 (2012): 56a–66 .

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вардомская Анна Александровна —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
AnutaV9@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vardomskaia Anna Alexandrovna —
Senior lecturer.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
AnutaV9@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2015 г.

УДК 623.9

А. В. Кузьменко

ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ БОРЬБОЙ ЗА ЖИВУЧЕСТЬ КОРАБЛЯ ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ АВАРИЯХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СИТУАЦИОННОГО АНАЛИЗА И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье рассмотрен подход к управлению борьбой за живучесть корабля при комплексных аварийных ситуациях на основе методов ситуационного анализа и имитационного моделирования. При использовании экспертных систем, базирующихся на ситуационном выборе управленческих решений, процесс доступа к информации приводит к многошаговым процедурам диалога оператора с базой данных, неприемлемым в условиях дефицита времени на принятие решений и реальной аварии в силу ее быстротечности, которая, как правило, носит комплексный характер. Для повышения качества рекомендаций и эффективности принимаемых решений в ходе борьбы за живучесть корабля предлагается подход к построению системы информационной поддержки принятия решений, в котором механизм выбора управленческих решений осуществляется на базе имитационного моделирования потоков опасных событий и их последствий в комплексной аварийной ситуации на объекте. Правило выбора основывается на ситуационном анализе,

закрывающемся в последовательном диалоге лица, принимающего решение, с прогнозными имитационными моделями, которые дополнены интерфейсными разработками, позволяющими качественно оценить состояние объекта управления по степени опасности.

Ключевые слова: система информационной поддержки, имитационное моделирование, борьба за живучесть корабля, комплексная аварийная ситуация.

НЕСМОТРЯ на появление усовершенствованных систем управления кораблем и, как следствие, уменьшение экипажа, существуют ограничения на минимальную численность экипажа. Связаны они со спецификой и трудоемкостью исполнения команд во время боевых действий — в первую очередь, с борьбой за живучесть корабля, включающей такие элементы как живучесть оружия и технических средств, непотопляемость, прочность, взрывопожаробезопасность, защита личного состава [1].

В наше время ВМС всего мира обращают особое внимание на усиленный контроль над живучестью корабля и необходимостью управления ею при помощи автоматизации многих аспектов данного направления как для повышения качества управления борьбой за живучесть корабля, так и для дальнейшей оптимизации численности экипажа корабля. В связи с этим, например, управление оборонных исследований и разработок Канады по направлению Атлантика инициировало проект «Борьба за живучесть и оптимизация численности экипажа» для получения сведений о том, как может быть решена задача дальнейшего сокращения экипажа на проектируемых кораблях. В [2] представлена полная критическая оценка имеющихся технологий в области системы поддержки борьбы за живучесть. В этот документ также входит рассмотрение новых технологий и решений, находящихся в разработке, и представление информации о будущих направлениях развития системы информационной поддержки борьбы за живучесть (СИП БЖ) как имеющих непосредственное влияние на оптимизацию численности экипажа корабля. Постоянные процессы разработки, совершенствования и интеграции «человеко-машинных» систем [3] являются ключом к решению поставленной задачи — уменьшению численности экипажа корабля без уменьшения боеспособности и качества борьбы за живучесть. В то же время они дают понимание баланса между стоимостью внедрения технологии и экономией, получаемой за счет снижения требований к укомплектованности экипажа.

Анализ имеющихся в открытом доступе данных отечественных и зарубежных разработок в области СИП БЖ [2] – [10] показал отсутствие комплексного решения задач борьбы за живучесть технических средств, непотопляемость, прочность, взрывопожаробезопасность и защищенность личного состава. Имеются отдельные реализованные программные разработки, решающие только одну из задач борьбы за живучесть (или затопление, или пожар, или выход из строя технических средств, или потеря прочности) в *отдельном* расчетном модуле [4], [6], [11]. Обзор данных разработок свидетельствует, что входящие в состав СИП БЖ расчетные модули элементов живучести корабля программно и алгоритмически не связаны друг с другом. Анализ основных путей исследования в области систем информационной поддержки управления борьбой за живучесть корабля представлен в публикациях [2], [12], [13]. Один из подходов к решению задачи построения СИП БЖ для борьбы с комплексной аварией предложен в [12], [13].

Управление борьбой за живучесть корабля можно отнести к классу реальных задач, для которых использование традиционных методов математики неосуществимо или осложнено. Управление борьбой за живучесть корабля характеризуется следующими особенностями: иерархически-сложной структурой объекта; требованием своевременного принятия решения, базирующегося на анализе большого объема постоянно изменяющейся информации; динамичностью и неопределенностью процессов, протекающих на корабле; большой размерностью вектора входных данных; присутствием различного рода влияющих данных (качественных, порядковых, количественных); дефицитом времени и др.

При решении слабо формализованных задач указанные свойства приводят к усложнению описания модели аварийной ситуации. В подобных ситуациях возникает потребность в информационной поддержке решения поставленной задачи, т. е. потребность в разработке комплекса соответствующих методов и технологических решений, обеспечивающих выработку верного решения для успешного выполнения задачи. К таким задачам относятся:

- создание и оптимизация информационных моделей для обеспечения лица, принимающего решения (ЛПР), необходимым объемом актуальной информации;
- составление эвристических процедур, допускающих исключение заведомо неприемлемых вариантов решения задачи;
- разработка алгоритмов обработки семантической нечеткой информации для принятия на ее основе оптимального управленческого решения;
- организация человеко-машинного интерфейса системы информационной поддержки борьбы за живучесть.

Важным свойством СИП БЖ является наличие взаимодействия человека и машины. Основной проблемой разработки таких систем является представление и учет ЛПР динамики реальных процессов, анализ и синтез неколичественной, нечеткой информации и интерпретация результатов в форме рекомендаций. В свою очередь, дополнительно возникает потребность в оптимизации алгоритмов взаимодействия модулей человеко-машинных систем и обработки нечеткой информации для принятия управленческих решений. В целом это указывает на актуальность исследований в области поддержки принятия решений. Реализация систем информационной поддержки на базе экспертных систем с использованием имитационно-вычислительных моделей-симуляторов под управлением когнитивной обобщающей метамодели с приоритетом действий ЛПР улучшает качество обработки информации и снижает временные затраты на выработку решения. На основе результатов моделирования ЛПР принимаются или корректируются управленческие решения. Разработка и развитие новых методов решения слабо формализованных задач базируется на автоматизации отдельных интеллектуальных функций обработки данных. На этом направлении в настоящее время общезначимым является использование интеллектуальных информационных алгоритмов [14].

Общий подход к обоснованию управленческих решений представлен в [15], [16]. В основе обоснования решения лежат:

- модель выбора, включающая предъявление конечного множества основных факторов и альтернатив выбора;
- механизм выбора — установление неэквивалентных (различной ценности) основных факторов и альтернатив выбора;
- правило выбора, выражающее цель выбора в виде назначения приоритетов (шкалы оценок) выбора альтернатив.

В общем виде задачу выбора можно представить в виде функции выбора C :

$$C: \{X''\} = C(X), \{X''\} \subset \{X'\} \subset \{X\},$$

где $\{X\}$ — универсальное (полное) множество предъявления, включающее все принципиально возможные значащие факторы и альтернативы выбора; $\{X'\}$ — допустимое множество предъявления, выделяющее из универсального множества те факторы и альтернативы выбора, которые могут быть исполнены или соответствовать целям оперирующей стороны (оператора или ЛПР) нормам или правилам, которых она придерживается; $\{X''\}$ — предпочтительное множество предъявления, выделяющее из всего допустимого множества только физически содержательные факторы, отвечающие физическим законам природы или условиям реальности.

Данная функция выбора, таким образом, используется не однократно, а в многошаговых процедурах принятия решений. Одновременно, по мере изменения возмущающих и управляющих воздействий, в модель выбора на каждом новом шаге решения задачи последовательно поступают вновь сформированные альтернативы для выбора. Максимальной эффективностью обладают

решения, устраняющие наибольшие негативные последствия от возмущающих воздействий при минимальных затратах на исполнение соответствующих управляющих воздействий. Для разрешения проблемной ситуации, связанной со случайными возмущающими воздействиями, для которых не могут быть заданы заранее соответствующие управляющие воздействия, применяются критериальные, ситуационные или равновесные правила выбора управляющего решения [17].

Рассмотрим ситуационный подход для обоснования управленческих решений, свойственный для операторской деятельности при взаимодействии со сложными техническими системами и комплексами машиностроения — такими как корабль. Выбор оператором решения из множества $\{X''\}$ характеризуется большим многообразием и сложностью. Это не позволяет мгновенно сделать выбор рационального решения без использования в дальнейшем принципа сужения множества решений. Число предъявляемых на этом этапе оператору вариантов ограничивается когнитивными способностями человека осмысленно оперировать тремя-четырьмя сущностями (факторами), изменяющимися во времени и удерживать пять – семь элементов информации в краткосрочной памяти [18], [19]. Соответственно для этого устанавливаем определенный набор каталожных (типовых) ситуаций $\{S^c\}$. В наших задачах это пожар, потеря остойчивости, поступление воды, навигационное воздействие и т. п., а также структурные уровни описания и дискретные оценки опасности событий. В таком случае текущую ситуацию $\{s^t\}$ из всего перечня каталожных ситуаций в соответствии с [15] можно записать как

$$s^t = s_i^c \Leftrightarrow x(s_i^c) \succ x(s_j^c), \forall j \neq i, x \in \{X''\}, s_i^c \in \{S^c\}.$$

Эта запись читается так: «Как только устанавливается тождество текущей ситуации s^t любой каталожной s_i^c из полного множества ситуаций $\{S^c\}$, так сразу (и обратно) выбирается решение $x(s_i^c)$, представляющее собой пару « i -ситуация – j -решение», которая становится предпочтительнее любого другого решения $x(s_j^c)$ из множества всех решений $\{X''\}$ ».

Множество каталожных ситуаций состоит из подмножеств исходных эксплуатационных режимов использования корабля, его технических средств и систем, корабельных комплексов, установок и механизмов. Выбор эффективных решений осуществляется последовательно на всех уровнях иерархической организации системы управления, начиная с базового (верхнего) и далее вниз. Движение по цепи критических неблагоприятных событий осуществляется до выявления причины, следствием которой стала опасная ситуация на верхнем уровне управления. Предпочтительное решение, устраняющее причину опасной ситуации, выбирается по правилу доступности и скорости реализации альтернатив выбора [17]. Таким образом, в производственной модели в общем виде представляется логика вывода. В принципе, это и есть механизм ситуационного выбора, который лежит в основе функционирования экспертной системы.

Недостатком информационной поддержки на базе экспертных систем является необходимость реализации сложного диалога ЛПП с ЭВМ при большом объеме информации, которая требует много времени у человека для получения точного ответа. Это снижает удобство пользования такой технологией и увеличивает время доступа к информации. Указанный недостаток ограничивает применение информационной поддержки на базе ситуационного подхода предоставлением необходимой справочной информации, проектно-конструкторской и нормативно-технической документации, правил и руководств по эксплуатации техники, а также мониторинга текущих параметров процессов на корабле. Рассмотренный подход не дает наиболее приемлемое решение, но, если принять во внимание динамическую вариативность критериев оценок решения, значения которых меняются во времени, а также потребность в ранжировании приоритетов решения, он обеспечивает выбор рационального решения.

В современной практике управления корабельной техникой для принятия решения, отвечающего выполнению поставленной задачи, уже недопустимо ограничиваться только информационным обеспечением оператора или использованием отдельных расчетных модулей (как уже было указано). Помимо этого наблюдается переход в концепции управления от «реагировать и устранять» к «прогнозировать и упреждать», а также прослеживается тенденция к оптимизации

численности экипажа. Существующие отечественные и мировые аналоги в области современных автоматизированных систем управления и информационных средств поддержки принятия решения большей частью представляют собой экспертные системы, основанные на ситуационном выборе управленческих решений и содержащие заранее рассчитанные варианты аварийных ситуаций, их последствий и соответствующие меры противодействия в виде статических «карт потерь» и рекомендаций. Понятно, что в случае несовпадения реальной ситуации с заранее рассчитанной СИП БЖ не предложит ЛПР адекватной рекомендации (она отсутствует в базе) и он, скорее всего, откажется от ее использования. Пополнение базы знаний экспертных систем осуществляется с использованием нейросетевого подхода. Доступ к большим объемам структурированной информации производится с помощью механизма выбора на основе диалоговых СУБД и приводит к многоступенчатой процедуре диалога оператора с базой данных, неприемлемым в условиях реальной аварии в силу ее быстротечности, которая к тому же, как правило, носит комплексный характер.

Для исключения данных недостатков наблюдается тенденция внедрения в процесс поддержки принятия решения имитационного моделирования, которое позволяет прогнозировать возможные состояния объектов при различных условиях [20]. Такой прогноз полезен при выборе управленческих решений на стадии борьбы за живучесть корабля в условиях комплексной аварийной ситуации.

В связи с этим, для повышения качества рекомендаций и эффективности принимаемых решений предлагается подход к построению системы информационной поддержки принятия решений, в котором механизм выбора управленческих решений осуществляется на базе имитационного моделирования потоков опасных событий и их последствий в комплексной аварийной ситуации на объекте, которое позволяет прогнозировать вероятные состояния объектов при дифференциальных условиях. Правило выбора основывается на ситуационном подходе, заключающемся в последовательном диалоге ЛПР с прогнозными имитационными моделями, которые дополнены интерфейсными разработками, позволяющими качественно оценить состояние объекта управления по степени опасности. В отличие от экспертных систем, предлагается не хранить в базе данных все пары возможных «ситуаций – решений», а вычислять процессы их возникновения с помощью логико-динамической имитационной модели комбинационного типа. Далее осуществляется эвристическая фильтрация в логико-лингвистические переменные и с помощью формальных процедур и когнитивной компьютерной графики применяется принцип ситуационного выбора.

При логико-динамическом моделировании комплексных аварийных процессов формируется оценка потерь технических свойств корабля во времени и возможности восстановления/сохранения их в соответствии с выбранными критериями живучести (исключение гибели, потеря хода и управления, потеря энергообеспечения и т. д.) на основании анализа остаточной работоспособности комплекса технических средств и оценки изменения посадки, запаса плавучести и устойчивости поврежденного корабля. Логико-динамическая модель позволяет учитывать различные варианты проектных решений и действий по борьбе за живучесть, а также изменение внешних обстоятельств и новые условия развития поражающих факторов. Имитационная логико-динамическая модель обладает «жестким» детерминизмом и позволяет проводить анализ видов последствий и критичности отказов в соответствии с [21] с отслеживанием их критических траекторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безнос Л. А.* Основные понятия и определения // В кн.: Энциклопедия «Машиностроение»; Т. IV-20. «Корабли и суда». Кн. 1. «Общая методология и теория кораблестроения» / Л. А. Безнос. — СПб.: Политехника, 2003. — С. 619–621.
2. *Cosby L.* Critical Assessment of Damage Control System Technologies. – Contract Report DRDC Atlantic CR 2006-283, December 2006 [Электронный ресурс] / L. Cosby, Y. Lamontagne. — Режим доступа: <http://cradpdf.drdc.gc.ca/PDFS/unc63/p527467.pdf> (дата обращения: 03.03.2015).

3. *Lamontagne Y.* New developments in damage control – interactive incident board management system – I²BMS // The Fourteenth International Ship Control Systems Symposium (SCSS) in Ottawa, Canada, on 21–23 September 2009 [Электронный ресурс] / Y. Lamontagne, O. Knutson. — Режим доступа: <http://www.mapps.l-3com.com/whitePapers/Marine/NEW%20DEVELOPMENTS%20IN%20DAMAGE%20CONTROL%20-%20INTERACTIVE%20INCIDENT%20MANAGEMENT%20SYSTEM%20BOARD.pdf> (дата обращения –01.06.2015).
4. Информационная поддержка борьбы за живучесть [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.seaproject.ru/activity/borba-za-zhivuchest> (дата обращения: 19.02.2016).
5. Battle Damage Control Systems. FrontLine-Defence Canada. Issue 2, IndustryspecialL-3 MAPPS, 2012 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://defence.frontline.online/article/2012/2/1727-Industry-Report%3A-L-3-MAPPS> (дата обращения: 19.07.2015).
6. Система информационной поддержки борьбы за живучесть [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://argos-navy.ru/content/sip_bg (дата обращения: 18.02.2016).
7. *Богданов Д. А.* Зарубежный опыт применения систем информационной поддержки борьбы за живучесть / Д. А. Богданов, В. В. Гапанюк, С. Н. Соловьев [и др.] // Морской вестник. — 2014. — № 3 (51). — С. 63–66.
8. The integrated control system for naval vessels [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.industry.siemens.com/verticals/global/de/marine/marineschiffe/automatisierung/Documents/sinavy-automation-en.pdf> (дата обращения: 19.02.2016).
9. Информационное обеспечение живучести морских технических объектов (СИП БЖ) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://neotech-marine.ru/sip-bg> (дата обращения: 18.02.2016).
10. *Gullaksen J.* Preliminary damage assessment process using decision support system – initial damage stability assessment and verification based on existing and proposals for future damage stability regulation // International conference Damaged Ship III, 2015, London, UK [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rina.org.uk/showproducts.html?product=7445> (дата обращения: 19.01.2016).
11. *Зайнуллин О. Ф.* Решение задач надводной непотопляемости в СИП БЖ подводных лодок / О. Ф. Зайнуллин // Материалы IX Санкт-Петербургской межрег. конф. «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2015)». — СПб., 2015. — С. 268.
12. *Ковтун Л. И.* Супервизорная система автоматизированного управления иерархически-структурированными организационно-техническими комплексами морской техники с использованием имитационно-вычислительных симуляторов / Л. И. Ковтун // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — № 54. — С. 5–48.
13. *Шарков Н. А.* Анализ и синтез иерархически-интегрированных человеко-машинных комплексов управления морской техникой в аварийных условиях на базе интеллектуальных технологий / Н. А. Шарков // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — № 54. — С. 49–76.
14. *Барсегян А. А.* Технологии анализа данных: DataMining, VisualMining, TextMining, OLAP / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко [и др.]. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007. — 384 с.
15. *Захаров И. Г.* Обоснование выбора. Теория и практика / И. Г. Захаров. — СПб.: Судостроение, 2006. — 528 с.
16. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
17. *Шарков Н. А.* Алгоритмы имитационного моделирования и ситуационного анализа процессов противоаварийного управления сложными человеко-машинными системами в обучающих судовых тренажерах / Н. А. Шарков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2007. — № 4 (38). — С. 219–229.
18. ГОСТ РВ 1900-003-2008. Корабельные функциональные комплексы и автоматизированные системы управления. Типовой состав эргономических характеристик: государственный военный стандарт. — М.: Стандартинформ, 2010.
19. ГОСТ Р МЭК 62508-2014. Менеджмент риска. Анализ влияния на надежность человеческого фактора. — М.: Стандартинформ, 2015.
20. Требования ВМФ к системам информационной поддержки по борьбе за живучесть надводных кораблей, кораблей специального назначения и морских судов обеспечения ВМФ / НИР «Разработка требований к системам информационной поддержки борьбы за живучесть НК». — СПб.: НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ФГБОУ ВПО ВУНЦ ВМФ «ВМА». — 2014.

21. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — 152 с.

THE APPROACH TO THE MANAGEMENT OF THE STRUGGLE FOR THE VITALITY OF THE SHIP FOR COMPLEX EMERGENCIES BASED ON THE METHODS OF SITUATIONAL ANALYSIS AND SIMULATION MODELING

The article describes the approach to the management of the struggle for the vitality of the ship for complex emergency situations, based on the methods of situational analysis and simulation. By using expert systems based on the situational choice of administrative decisions, the process of access to information leads to multistep procedures Operator dialogue with the database, unacceptable under time pressure on decision-making and the actual accident because of its transience, which, as a rule, is complex. To improve the quality of recommendations and effectiveness of decisions taken in the course of the struggle for the survival of the ship the approach to construction information decision support system, in which management decisions the selection mechanism is carried out on the basis of simulation modeling flows of hazardous events and their consequences in a complex emergency situation at the facility. The rule to choose is based on the situational analysis of decision-makers in a consistent dialogue with the forecast simulation models, which are complemented by interface development, allowing qualitatively assess the state of the control object on the degree of danger.

Keywords: system of information support, simulation modeling, the struggle for vitality of the ship, a complex emergency.

REFERENCES

1. Beznos, L. A. *Osnovnyepojatijaiopredelenija. In.: Jenciklopedija «Mashinostroenie»; Tom IV-20: Korabliisuda; Kniga 1: Obshhajametodologijaiteorijakorablestroeniju.* SPb.:Politehnika, 2003: 619–621.
2. Lloyd, Cosby, and Yvan Lamontagne. Critical Assessment of Damage Control System Technologies. Web. 03 March 2015 <<http://cradpdf.drdc.gc.ca/PDFS/unc63/p527467.pdf>>.
3. Lamontagne, Yvan, and Olaf Knutson. New developments in damage control - interactive incident board management system. Web. 01 June 2015 <<http://www.mapps.l-3com.com/whitePapers/Marine/NEW%20DEVELOPMENTS%20IN%20DAMAGE%20CONTROL%20-%20INTERACTIVE%20INCIDENT%20MANAGEMENT%20SYSTEM%20BOARD.pdf>>.
4. Informacionnaja podderzhka borby za zhivuchest. Web. 19 Feb. 2016 <<http://www.seaproject.ru/activity/borba-za-zhivuchest>>.
5. MAPPS, L-3. Battle Damage Control Systems. Industry special L-3 MAPPS. FrontLine-Defence Canada, 2012. 19 July 2015 <<http://defence.frontline.online/article/2012/2/1727-Industry-Report%3A-L-3-MAPPS>>.
6. Sistema informacionnoj podderzhki borby za zhivuchest. Web. 18 Feb. 2016 <http://argos-navy.ru/content/sip_bg>.
7. Bogdanov D. A., V. V. Gapanyuk, S. N. Solovev, S. V. Stupnenkov, and R. A. Myskin. "Foreign experience in applying information support systems of struggle for survival." *Morskoy Vestnik* 3(51) (2014): 63–66.
8. The integrated control system for naval vessels. Web. 19 Feb. 2016 <<http://www.industry.siemens.com/verticals/global/de/marine/marineschiffe/automatisierung/Documents/sinavy-automation-en.pdf>>.
9. Informacionnoe obespechenie zhivuchesti morskikh tehicheskikh obektov (SIP BZh). Web. 18 Feb. 2016 <<http://neotech-marine.ru/sip-bg>>.
10. Gullaksen, J. Preliminary damage assessment process using decision support system - initial damage stability assessment and verification based on existing and proposals for future damage stability regulation. International conference Damaged Ship III, 2015, London, U. London, UK, 25 March 2015. Web. 19 Jan. 2016 <<http://www.rina.org.uk/showproducts.html?product=7445>>.
11. Zaynullin, O. F. "Reshenie zadach nadvodnoj nepotopljaemosti v SIP BZh podvodnyh lodok." *IX Sankt-Peterburgskaja mezhhregionalnaja konferencija «Informacionnaja bezopasnost regionov Rossii (IBRR-2015)»: materialy konferencii.* SPb., 2015: 268.

12. Kovtun, L. I. “Supervizornaja sistema avtomatizirovannogo upravlenija ierarhicheski-strukturirovannymi organizacionno-tehnicheskimi kompleksami morskoy tehniki s ispolzovaniem imitacionno-vychislitelnyh simuljatorov.” *Trudy CNIИ im. akad. A.N. Krylova* 54 (2010): 5–48.
13. Sharkov, N. A. “Analiz i sintez ierarhicheski-integrirovannyh cheloveko-mashinnyh kompleksov upravlenija morskoy tehniki v avarijnyh uslovijah na baze intellektualnyh tehnologij.” *Trudy CNIИ im. akad. A.N. Krylova* 54(2010): 49–76.
14. Barsegjan, A. A., M. S. Kuprijanov, V. V. Stepanenko, and I. I. Holod. *Tehnologii analiza dannyh: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP*. SPb.: BHV-Peterburg, 2007.
15. Zaharov, I. G. *Obosnovanie vybora. Teorija i praktika*. SPb.: Sudostroenie, 2006.
16. Pospelov, D. A. *Situacionnoe upravlenie: teorija i praktika*. M.: Nauka, 1986.
17. Sharkov, N. A. “Algoritmy imitacionnogo modelirovanija i situacionnogo analiza processov protivopavarijnogo upravlenija slozhnymi cheloveko-mashinnymi sistemami v obuchajushhih sudovyh trenazherah.” *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 4(38) (2007): 219–229.
18. Russian Federation. GOST RV 1900-003-2008. Korabelnye funkcionalnye komplekсы i avtomatizirovannye sistemy upravlenija. Tipovoj sostav jergonomicheskikh harakteristik: gosudarstvennyj voennyj standart. M.: Standartinform, 2010.
19. Russian Federation. GOST R MJeK 62508 – 2014. Menedzhment riska. Analiz vlijanija na nadezhnost chelovecheskogo faktora. M.: Standartinform, 2015.
20. Proekt trebovanij VMF k sistemam informacionnoj podderzhki po borbe za zhivuchest nadvodnyh korablej, korablej specialnogo naznachenija i morskikh sudov obespechenija VMF. 2014.
21. GOST 27.310-95. Dependability in technics. Failure mode, effects and criticality analysis. Basic principles. Minsk: Mezhdgosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кузьменко Александр Владимирович — преподаватель.
ФГК ВОУ ВПО Военно-морской институт ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова»
kuzmenko_alexandr@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuzmenko Alexandr Vladimirovich — lecturer.
Naval Institute of Military Training and Research Center of the Navy “Naval Academy”
kuzmenko_alexandr@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2016 г.

УДК 004.42

**А. Н. Егоров,
В. А. Кузнецов**

РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ КОНВЕЙЕРОМ ШЛЮЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассматриваются вопросы оптимизации оперативного управления транспортным конвейером шлюзованной системы. Обосновывается возможность реализации автоматизированной диспетчеризации судопропуска на основе взаимодействия имитационной модели и алгоритма управления в реальном масштабе времени, конечной целью которой является расписание проводки судов. До настоящего времени подобных систем, работающих в рамках шлюзованного судоходного канала в целом, не создано. Делается вывод, что для этого необходимо использовать системы, обеспечивающие автоматический обмен информацией между судами и береговыми службами, а также параллельные алгоритмы обработки данных. В качестве среды реализации предлагается универсальная программная оболочка распараллеливания, модель и особенности функционирования которой представлены в статье.

Отмечается, что её основным назначением является организация эффективного выполнения прикладного решения пользователя.

Ключевые слова: оптимизация оперативного управления, шлюзованные судоходные каналы, параллельные алгоритмы, технология CUDA.

Введение

На внутренних водных путях России, являющихся частью единой транспортной системы, насчитывается более 150 шлюзов, большинство из которых интегрированы в шлюзованные системы (шлюзованные судоходные каналы — ШСК), крупнейшими представителями которых являются Волго-Балтийский водный путь и Волго-Донской судоходный канал. Исходя из особенностей функционирования ШСК, в работе [1] делается вывод о том, что ШСК представляет собой конвейерную систему с наличием противотока (КСП), т. е. класса транспортных систем типа судоходного канала, отличительными особенностями которых наряду со стохастичностью являются динамичность, дискретность, многомерность, а также влияние неуправляемых и субъективных факторов.

В настоящее время ШСК являются существенными ограничителями дальнейшей интенсификации транспортного процесса. Мероприятия по автоматизации управления судопропуском способны увеличить пропускную способность каналов до 15 – 20 % и поэтому являются предпочтительной альтернативой по сравнению со строительством параллельных «ниток» сооружений, требующим значительно больших инвестиций, трудовых ресурсов и времени. Однако проблема автоматизации и, как следствие, оптимизация оперативного управления транспортными конвейерами, в том числе КСП типа ШСК, решены не полностью. Так, в практике оперативного диспетчерского управления судопропуском преобладают эвристические методы и только в последнее время начали проводиться работы с использованием компьютерных технологий для решения указанных проблем. Например, в информационном сообщении о системе управления судоходными шлюзами компании «Траскон Текнолоджи» [2] приведены краткие сведения о функционале автоматизированного рабочего места (АРМ) диспетчера судоходного канала:

- автоматизированная подготовка распоряжений и указаний по судопропуску для вахтенных дежурных шлюзов и дистанционного управления водным режимом канала;
- специализированное программное обеспечение (ПО) для оптимизации судопропуска через канал с учетом экономии энергоресурсов;
- фиксация всех действий по судопропуску и работе оборудования в базе данных;
- автоматизированная подготовка отчетной и статистической информации.

Заметим, что другой информации (например, математических моделей решения задачи оптимизации судопропуска, а также методов, используемых при разработке специализированного ПО) эти сведения не содержат.

В настоящее время современные информационные технологии интенсивно привлекаются для решения вспомогательных задач, напрямую не связанных с оптимизацией оперативного управления транспортным конвейером типа ШСК: автоматизации управления технологическим процессом шлюзования (системы АСУ ТП) [3], [4], получения навигационной и другой информации о судах (автоматические идентификационные системы АИС) [5].

В работах [5], [6] проблемы автоматизации и на их основе построение оптимального расписания шлюзования судов рассматриваются только в рамках одного шлюза. На самом деле, такое расписание всегда должно являться следствием автоматизированной диспетчеризации судопропуска в ШСК.

Теоретические и методические основы оптимизации оперативного управления транспортным конвейером типа ШСК, представленные в работе [1], дают возможность реализации автоматизированной диспетчеризации судопропуска на основе взаимодействия имитационной модели и алгоритма управления в реальном масштабе времени. Это утверждение основано на том, что имитационная модель КСП, основанная на формализованном описании всех подсистем ШСК

(«Шлюз», «Трасса судопропуска», «Судно», «Внешние условия»), непосредственно связана с алгоритмом управления. С одной стороны, имитация является формальной реализацией функционирования всей системы, отражающей динамику состояния КСП с учетом влияния стохастических факторов, и, таким образом, является исходным моментом для синтеза алгоритмов управления. С другой стороны, имитационная модель КСП отражает принципы, заложенные в стратегию управления, и является совместимой с ними.

Конечной целью автоматизированной диспетчеризации судопропуска на основе математической модели системной оптимизации (например, по критерию минимума совокупных потерь провозной способности при прохождении судами ШСК в целом с учетом естественных и технологических ограничений) является расписание (график проводки судов), формализация которого представлена в работе [1]. Для его построения необходима имитационно-управляющая система (ИУС) ШСК, которая должна содержать в своем составе имитационную модель функционирования ШСК, осуществляющую генерацию допустимых вариантов управления и имитационное моделирование поведения системы при принятии этих вариантов. До настоящего времени подобных систем, работающих в реальном масштабе времени, не создано. Это объясняется следующими обстоятельствами. Во-первых, только в течение последнего времени появились навигационные системы, предназначенные для автоматического обмена информацией между судами и береговыми службами [5], и, во-вторых, вычислительная мощность цифровой техники вносила существенные ограничения до тех пор, пока не появилась возможность использования параллельных алгоритмов обработки информации.

Модель функционирования системы

Рассмотрим структуру и модель функционирования автоматизированной системы оптимизации оперативного управления транспортным конвейером типа ШСК, основными компонентами которой являются:

- шлюзы, каждый из которых оборудован АСУ ТП и системами мониторинга его технического состояния;
- кластер серверов;
- аппаратно-программный комплекс для оптимизации управления судопропуском ШСК;
- АРМ диспетчера;
- технические средства, обеспечивающие мониторинг погодных условий, обмен навигационной и другой информацией между судами и береговыми службами (сведения о рейсе, технические характеристики, тип судна, указания о графике его прохождения ШСК и др.).

Один из возможных вариантов организации системы оптимизации управления судопропуском ШСК и схема взаимодействия ее компонентов приведены на рис. 1. Каждый из компонентов включён в единую корпоративную сеть. На схеме такие связи изображены сплошными линиями, пунктирными линиями показано взаимодействие судов и береговых станций мониторинга. Такая конфигурация позволяет в режиме реального времени осуществлять сбор и передачу информации о судах, показателях технического состояния шлюзов, уровне воды, погодных условиях и др., что в интерактивном виде отображается на АРМ диспетчера. Это, в конечном итоге, обеспечивает постоянный мониторинг ситуации на канале. В случае необходимости или отсутствия каких-либо данных диспетчер с помощью АРМ может вручную добавлять или корректировать их.

На основе актуальной на текущий момент информации выполняется расчёт оптимального расписания проводки судов по ШСК, из которого передаются сведения о дальнейших действиях: судам — график прохождения по ШСК, шлюзам — расписание шлюзования.

Процесс мониторинга также позволяет отслеживать ход выполнения прогнозного расписания, и в случаях отклонения от него или других чрезвычайных ситуаций (например, выход из строя технических средств судна или шлюза, изменение погодных условий, влияющих на судопропуск), сообщение об этом незамедлительно отображается на АРМ диспетчера для принятия оперативного решения.

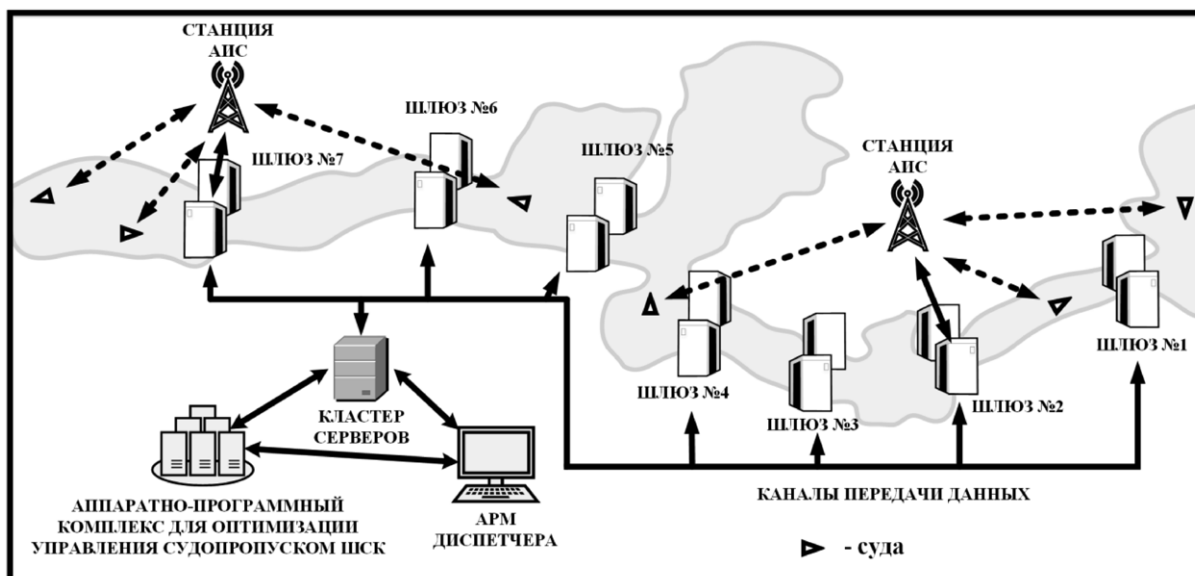


Рис. 1. Пример организации системы оптимизации управления судопропуском ШСК

Распараллеливание вычислений

На данный момент работа системы в режиме реального времени возможна лишь за счёт применения параллельных технологий при построении прогнозного расписания проводки судов через ШСК. Для такой реализации предлагается воспользоваться универсальной программной оболочкой распараллеливания (ПОР) [7], основным назначением которой является организация эффективного исполнения прикладного решения пользователя. Для этого ПОР использует весь потенциал подключенных к компьютеру вычислительных устройств, допускающих распараллеливание, а реализация в дальнейшем возможности объединения компьютеров в единую вычислительную сеть позволит создавать мощные аппаратно-программные комплексы.

Корпоративная сеть в рассматриваемой автоматизированной системе оптимизации оперативного управления транспортным конвейером типа ШСК является незаменимым компонентом. Учитывая тот факт, что ШСК — стратегический объект, информация в сети должна передаваться по защищённому каналу в зашифрованном виде. Однако в процессе функционирования могут возникнуть ситуации, связанные с потерей или искажением секретных ключей, что приведёт к потере данных и обрыве связи [8], а это в условии работы системы в режиме реального времени является катастрофическим. Для восстановления таких ключей с целью обеспечения доступа к зашифрованным данным и возобновлению соединения также можно использовать ПОР [8]. Таким образом, применение ПОР позволяет решить как задачу оптимизации оперативного управления, так и проблему функционирования корпоративных сетей на ШСК.

Модель ПОР

ПОР представляет собой совокупность взаимодействующих модулей, связующим звеном которых является ядро программной оболочки (ЯПО). ЯПО включает базовую функциональность ПОР и имеет самую высокую независимость от других модулей. Вся основная логика работы ПОР заложена во взаимодействии ЯПО с модулями устройств. Модули устройств (МУ) выполняют такую основную работу вычислений ПОР, как решение пользовательских задач (ПЗ). Предполагается также, что МУ имеют одно из двух состояний: busy (устройство занято) и free (устройство свободно).

При формировании требований к параллельным алгоритмам наиболее важным является определение последовательности выполнения определённых событий для каждого вычисления программы. Это позволяет для описания модели ПОР использовать язык темпоральной логики линейного времени (LTL) [9], [10], в котором учтён феномен времени. Каждое событие будет ха-

рактизоваться булевой переменной, которая принимает значение «Истина» тогда и только тогда, когда наступает событие.

В LTL помимо булевых логических связей для описания причинно-следственной зависимости событий во времени используются темпоральные операторы:

- $X\phi$ «в следующий момент времени» — указывает на то, что ϕ выполняется на следующем состоянии пути;
- $F\phi$ «когда-то в будущем» — указывает на то, что ϕ будет соблюдаться в каком-то последующем состоянии пути;
- $G\phi$ «всегда» — указывает на то, что ϕ выполняется в каждом состоянии пути;
- $\phi U \psi$ «до тех пор, пока» — указывает на то, что ϕ выполняется до тех пор, пока не станет верно ψ ;
- $\phi R \psi$ «высвободить, открепить» — указывает на то, что ψ может перестать быть верным только после того, как станет верно ϕ .

Для описания модели введем следующие атомарные высказывания, соответствующие основным событиям вычислений программы:

- try_i — i -й пользователь собирается отправить задачу;
- add_i — i -я ПЗ добавляется в очередь задач;
- del_i — i -я ПЗ удаляется из очереди задач;
- $send_i$ — i -я ПЗ отправляется на решение МУ;
- $create_i$ — i -я подзадача формируется из ПЗ;
- $solve_i$ — i -й МУ решил подзадачу;
- $resv_i$ — i -й результат подзадачи МУ отправляется ЯПО;
- res_i — формируется i -й результат ПЗ;
- $free$ — МУ свободен;
- $busy$ — МУ занят;
- end — получен конечный результат ПЗ;
- $empty$ — очередь задач пуста.

Рассмотрим математическую модель программной оболочки, построенную на основе языка LTL:

Всякий раз, когда пользователь собирается запустить ПЗ, ЯПО добавляет себе ПЗ в очередь задач:

$$G(try_i \rightarrow add_i). \quad (1)$$

Пока очередь задач не окажется пустой ($empty$), ЯПО будет отправлять задачи на решение свободным МУ ($free$):

$$G((free \rightarrow send_j) U empty). \quad (2)$$

Всякий раз, когда ЯПО отправляет задачу МУ, формируется подзадача для этого модуля:

$$G(send_i \wedge X create_i). \quad (3)$$

Всякий раз, когда у МУ формируется подзадача, он становится занятым ($busy$):

$$G(create_j \rightarrow busy). \quad (4)$$

Всякий раз, когда МУ становится занятым, должна когда-нибудь решиться подзадача:

$$G(busy \rightarrow F solve_i). \quad (5)$$

После решения подзадачи МУ возвращает результат ЯПО, и становится свободным ($free$):

$$G(solve_i \rightarrow X(resv_i \wedge free)). \quad (6)$$

Всякий раз, когда ЯПО получает результат решения подзадачи от МУ, ЯПО формирует результат соответствующей ПЗ:

$$G(\text{resv}_i \rightarrow X \text{res}_j). \quad (7)$$

Всякий раз, когда ЯПО формирует результат решения ПЗ, оболочка проверяет, получен или нет конечный результат. Если этот результат получен, то ПЗ удаляется и очереди:

$$G((\text{res}_i \wedge \text{end}) \wedge \text{del}_j). \quad (8)$$

Полученные зависимости темпоральной логики позволяют представить псевдокод основных процессов модели ПОР (листинги 1 и 2). Для каждой операции псевдокода ставится счетчик. Следует заметить, что псевдокод МУ является инвариантным по отношению ко всем вычислительным устройствам:

```

while (true)
{
1.1.   if (try)
1.2.
1.3.   add();
1.4.   while (!empty && status == free)
1.5.
       send();
1.6.   if (recv())
1.7.   {
1.8.
       res();

       if (end)

       del();
       }
}
    
```

Листинг 1. Псевдокод ядра программной оболочки модели ПОР

```

while (true) {
2.1.   if (create()) {
2.2.
2.3.   status = busy;
2.4.
2.5.   while (!solve) {}

       recv();

       status = free;
       }
}
    
```

Листинг 2. Псевдокод модуля устройств модели ПОР

В соответствии с построенным псевдокодом строится размеченная система переходов LTS (Labelled Transition System), где учитываются всевозможные состояния ПОР, основными из которых являются:

- счетчики выполнения команд;
- состояние решения задачи или подзадачи (решено / не решено);
- состояние модуля устройства (занят / свободен).

На рис. 2 приведены схемы LTS каждого отдельного потока: единственного для ЯПО и множества потоков МУ. В узлах через запятую показаны значения основных состояний ПОР. Поскольку программная реализация обеспечивает работу со многими процессами МУ, рассмотрим LTS-схему, демонстрирующую динамику взаимодействия двух процессов МУ и одного процесса ЯПО (рис. 3). ЯПО управляет работой процессов МУ, выполняемых параллельно. Взаимодействие МУ и ЯПО, осуществляемое во временные отметки отправки (блок состояния ЯПО — «1.4, false») и получения (блок состояния ЯПО — «1.5, false») результата решения подзадачи МУ, должно быть синхронизировано. На схеме синхронизация процессов показана жирными линиями.

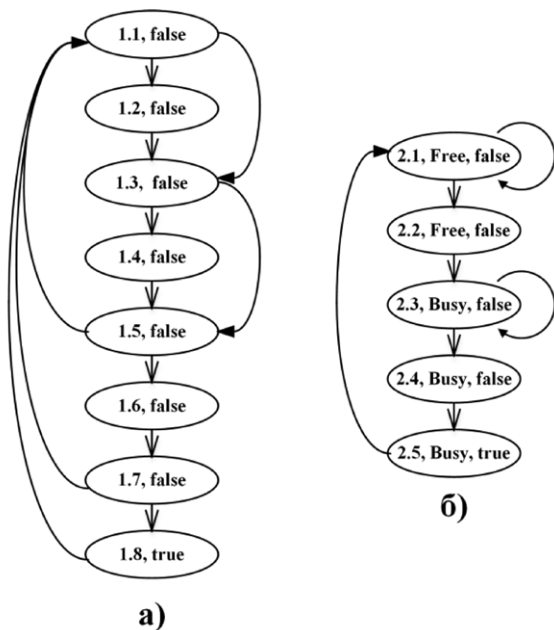


Рис 2. LTS потоков ПОР:
а — ядро программной оболочки; б — модуль устройств

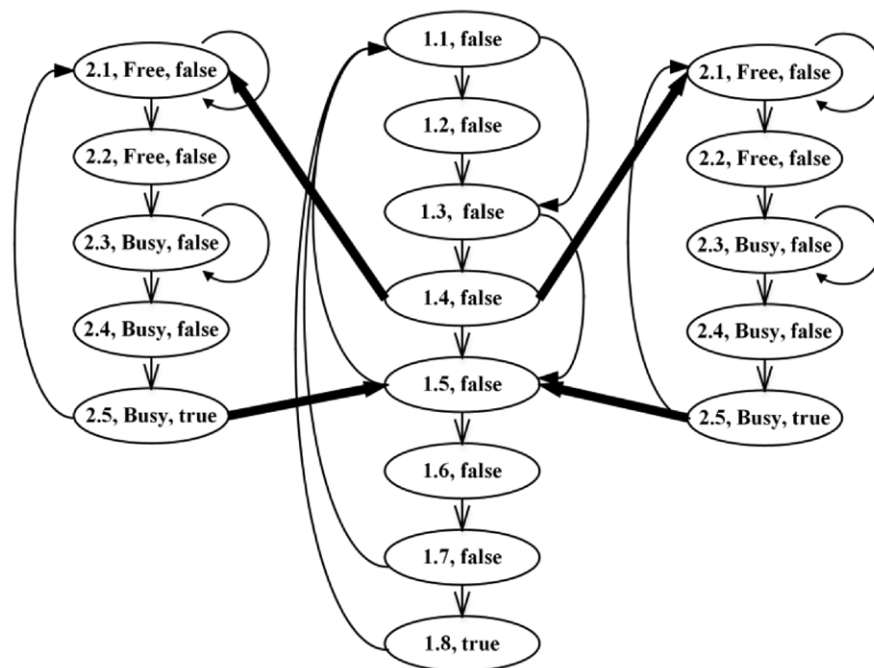


Рис. 3. LTS взаимодействия процесса ядра программной оболочки с двумя процессами модуля устройств

Программная реализация

ПОР реализует универсальный подход к распараллеливанию прикладных решений пользователя, используя весь потенциал подключенных к компьютеру вычислительных устройств, допускающих распараллеливание. Каждому типу устройства соответствует свой обработчик, что даёт возможность для повышения производительности воспользоваться особенностями их архитектуры. Прикладные решения реализуются в виде dll-библиотек, разработанных для каждого типа устройства, работающего с ПОР. Каждая библиотека должна содержать значения параметров, требуемых для настройки среды программной оболочки, таких как размер массива бинарных данных задачи и результата её решения, идентификатор задачи и др. Кроме того, необходимо реализовать ряд экспортных функций, обеспечивающих выполнение следующих операций:

1. Score — оценка производительности устройства.
2. Parser — проверка, обработка и формирование данных ПЗ.
3. Cut — формирование данных подзадачи.
4. SimSim — решение подзадачи.
5. Result и ResultBuild — формирование общего решения ПЗ.

ПОР состоит из модулей, работу которых организует ЯПО. Схема взаимодействия модулей программной реализации приведена на рис. 4, где экспортные функции dll-библиотек представлены в виде отдельных модулей и выделены серым цветом. Сплошными линиями показаны связи между модулями, образующими ЯПО, пунктирными обозначена динамика процесса решения ПЗ. Модули, взаимодействия которых обозначены жирными линиями, выполняются параллельно.

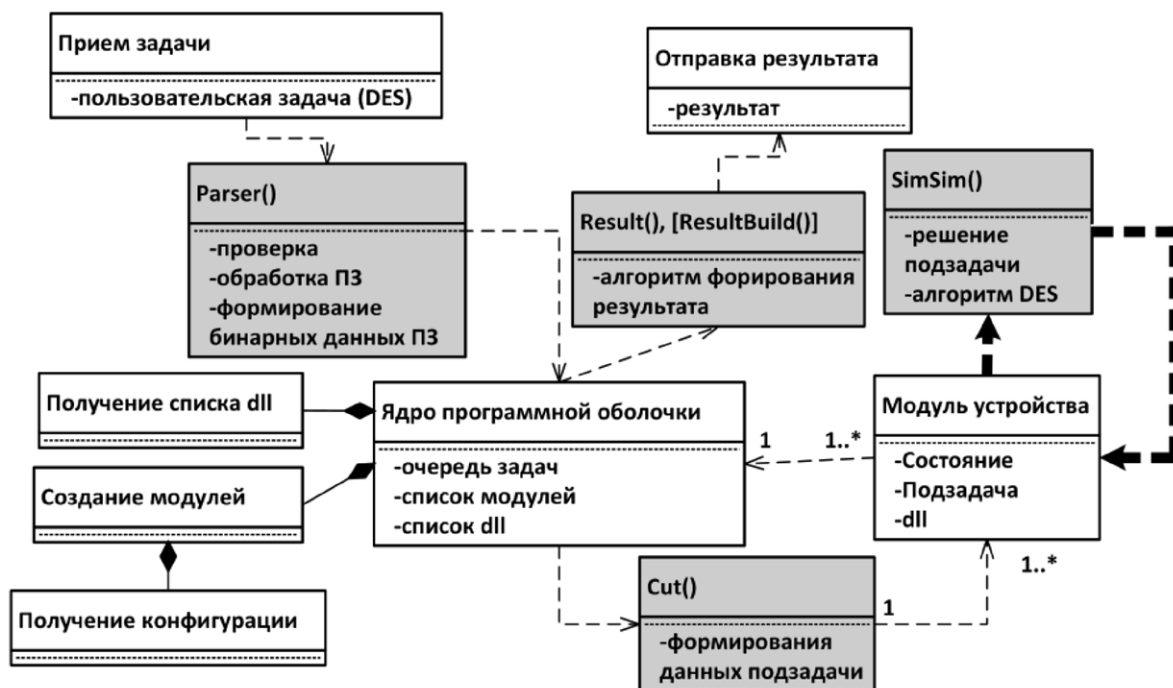


Рис. 4. Схема взаимодействия модулей ПОР

Опишем работу ПОР в виде пошагового алгоритма.

Этап 1. Создание модулей устройств (МУ), отвечающих за взаимодействие с конкретным аппаратным средством, на основе информации, сформированной в результате предварительного анализа вычислительных устройств компьютера, с которыми поддерживает работу ПОР.

Этап 2. Инициализация задачи посредством считывания и обработки данных конфигурационного файла, созданного пользователем, который содержит информацию о типе задачи и бинарные данные задачи, соответствующие выбранному типу.

Этап 3. Решение полученной задачи:

– шаг 1 — с помощью функции «Score», вызванной из соответствующей dll-библиотеки, оценивается скорость решения текущей ПЗ на определенном устройстве;

– шаг 2 — ЯПО отправляет задачу на решение множеству параллельно работающих МУ, при этом, в зависимости от оценки производительности устройства, модуль «Cute» формирует данные подзадачи для каждого МУ;

– шаг 3 — в процессе решения подзадачи модуль «SimSim» осуществляет дополнительное распараллеливание вычислительного процесса, используя особенности аппаратного средства;

– шаг 4 — после решения подзадачи МУ отправляет результат ЯПО.

Этап 4. Формирование общего результата решения задачи, на основе информации полученной от МУ, и отправка его пользователю.

При создании комплекта dll-библиотек для решения определённой задачи реализация функций «Score» и «SimSim» является уникальной по отношению к различным аппаратным средствам. В свою очередь, функции Parser, Cute, Result и ResultBuild, зачастую, являются инвариантными, однако в ряде случаев реализации отличаются. Например, в процессе распараллеливания вычислительного процесса функцией «SimSim» на конкретном устройстве могут потребоваться дополнительные параметры, в связи с чем формирование данных подзадачи функцией «Cute» будет другим.

Архитектура ПОР позволяет практически не ограниченно расширять список поддерживаемых устройств и задач. На текущий момент программная оболочка может использовать центральные процессоры и графические видеокарты, которые поддерживают технологию CUDA компании NVIDIA. CUDA — это платформа параллельных вычислений и модель программирования, позволяющая существенно увеличить вычислительную производительность за счёт максимально эффективного использования ресурсов видеокарты (графических процессоров и памяти) компании NVIDIA.

Выводы

1. Реализация автоматизированной системы оптимизации оперативного управления транспортным конвейером типа ШСК, работающей в режиме реального времени, стала возможной благодаря, во-первых, появлению навигационных систем, предназначенных для автоматического обмена информацией между судами и береговыми службами, и, во-вторых, применению параллельных алгоритмов для повышения эффективности вычислений в процессе составления оптимального расписания проводки судов через шлюзованную систему.

2. В качестве среды реализации рассмотрена ПОР, основной целью которой является организация эффективного исполнения прикладного решения пользователя. Программная оболочка реализует универсальный подход к распараллеливанию вычислений и обеспечивает взаимодействие с пользователем, подключенными к компьютеру вычислительными устройствами, допускающих распараллеливание, и распределение нагрузки между этими устройствами, а реализация в дальнейшем возможности объединения компьютеров в единую вычислительную сеть позволит создавать мощные аппаратно-программные комплексы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутов А. С. Транспортные системы: моделирование и управление / А. С. Бутов, Д. В. Гаскаров, А. Н. Егоров [и др.] / под общ. ред. проф. А. С. Бутова. — СПб.: Судостроение, 2001. — 552 с.
2. Траскон Текнолоджи [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://tta.ru/projects/-transport/iustbs.html> (дата обращения: 26.03.2016).
3. Морозов В. Н. Комплексная система автоматизации судопропуска Шекнинского гидроузла / В. Н. Морозов, И. Л. Краснощеков, Л. А. Павлович [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2015. — Т. 17. — № 2–4. — С. 843–850.

4. Бутин В. П. Автоматизация швартовки судов при их шлюзовании / В. П. Бутин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 3. — С. 31а–42.
5. Белоусов И. В. Применение информационных технологий для управления движением судов через шлюз / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2015. — № 2 (9). — С. 13.
6. Стальмаков В. А. Параллельный генетический алгоритм для решения задачи составления расписания прохождения судов через шлюзованные системы и его верификация / В. А. Стальмаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 93–102.
7. Св. ГР № 2014619266 РФ. Программная оболочка распараллеливания процесса вычисления прикладных решений / А. Н. Егоров, В. А. Кузнецов, И. А. Назаргулов; правообладатель: Санкт-Петербург, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова; заявл. 18.07.2014; опубл. 11.09.2014.
8. Егоров А. Н. Модель распараллеливания вычислений для повышения эффективности восстановления доступа к данным в корпоративных сетях / А. Н. Егоров, В. Е. Марлей, В. А. Кузнецов [и др.] // Труды СПИИРАН. — 2015. — № 5 (42). — С. 37–55.
9. Baier C. Principles of Model Checking / C. Baier, J.-P. Katoen. — Cambridge: The MIT Press, 2008. — 994 p.
10. Kröger F. Temporal Logic and State Systems / F. Kröger, S. Merz. — Berlin: Springer, 2008. — 436 p.

PARALLEL COMPUTING FOR OPTIMIZATION OF OPERATIONAL MANAGEMENT OF THE TRANSPORT CONVEYOR OF LOCK SYSTEM

In article the optimization of operational management of the transport conveyor of lock system are considered. Substantiates the possibility of implementing automated dispatching passing of lock system on based interaction simulation model and control algorithm in real time, the purpose of which is the passage of ships schedule. To date such systems operating for the whole lock canal, not created. It is concluded that this requires the use of the system that allows the automatic exchange of information between ships and shore services, as well as parallel data processing algorithms. As the environment of implementing is proposed universal program shell of parallelizing, model and implementation feature of which is presented in the article. It is noted that its main purpose is organization of efficient execution of user application solution.

Keywords: optimization of operational management, lock canal, parallel algorithms, CUDA technology.

REFERENCES

1. Butov, A. S., D. V. Gaskarov, A. N. Yegorov, and N. V. Krupenina. *Transportnye sistemy: modelirovanie i upravlenie*. SPb.: Sudostroenie, 2001.
2. Traskon Teknologzhi. Web. 26 March 2016 <<http://tta.ru/projects/transport/iustbs.html>>.
3. Morozov, V. N., I. L. Krasnoshhekov, L. A. Pavlovich, I. L. Pavlovich, D. B. Krasinskij, I. A. Danilushkin, E. V. Mel'nikov, and S. A. Kolpashhikov. "Crafts passing automation complex system at Sheksninskiy water-engineering system." *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 17.2–4 (2015): 843–850.
4. Boutin, V. P. "Automation of the mooring of ships during their locking through." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij*. 3 (2010): 31a–42.
5. Belousov, I. V., V. F. Samosejko, and A. V. Saushev. "Application of information technology to control the movement of ships through a lock." *Modeling, Optimization and Information Technology* 2(9) (2015): 13.
6. Stalmakov, V. A. "Parallel genetic algorithm for solving scheduling passing through the gateways system and its verification." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(23) (2014): 93–102.
7. Yegorov, A. N., V. A. Kuznetsov, and I. A. Nazargulov. Program shell of parallelizing the computation of application solutions. Russian Federation, assignee. Certificate of State registration 2014619266. 11 Sept. 2014.

8. Yegorov, A. N., V. Y. Marley, V. A. Kuznetsov, and I. A. Nazargulov. “The model of parallel computing to effectiveness improvement of the restoration of access to data in corporate networks.” *SPIIRAS Proceedings* 5(42) (2015): 37–55.

9. Baier, C., and J.-P. Katoen. *Principles of Model Checking*. Cambridge: The MIT Press, 2008.

10. Kröger, F., and S. Merz. *Temporal Logic and State Systems*. Berlin: Springer, 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Егоров Александр Николаевич —

кандидат технических наук, доцент.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С.О. Макарова»

eanspb@rambler.ru, kaf_vsi@gumrf.ru

Кузнецов Виталий Александрович — аспирант.

Научный руководитель:

Егоров Александр Николаевич.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

kuznecov.v.spb@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yegorov Alexander Nikolayevich —

Ph.D., associate professor.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

eanspb@rambler.ru, kaf_vsi@gumrf.ru

Kuznetsov Vitaliy Aleksandrovich — postgraduate.

Supervisor:

Yegorov Alexander Nikolayevich

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

kuznecov.v.spb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2016 г.

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 2 (36)

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 25.04.16. Формат 60x90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 28,25. Тираж 500 экз. Заказ № 208/16

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7