

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**

Том 12. № 2

**Vestnik Gosudarstvennogo universiteta
morskogo i rechnogo flota
imeni admirala S. O. Makarova**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2020. — Т. 12. — № 2. — 202 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

«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 СМИ от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы оригинальных научных исследований и 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».

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. 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.

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

С 2019 года Вестник издается при поддержке ООО «СКФ Арктика», дочерней компании группы «Совкомфлот».



СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ221

Смоленцев С. В., Сазонов А. Е., Пелевин А. Е. Значение контекста в задаче кооперативного маневрирования безэкипажных судов221

Кузнецов А. Л. Матричный метод поиска путей на взвешенных ориентированных графах в задачах сетевого планирования при проектировании и эксплуатации морских портов230

Фадюшин С. Г. Математическое описание количественной оценки принятия решений судоводителем239

Изотов О. А., Васильев Ю. И., Ражев О. А. Процессы формирования сборных контейнерных партий груза252

Ююкин И. В. Аппроксимация геоида методами сплайн-функций262

Устинов Ю. М., Маринич А. Н., Горобцов А. П. Определение ограничений по числу судов с взаимным обменом навигационными сообщениями с помощью судовой аппаратуры автоматической идентификационной системы272

Коптев А. В. Описание движения волн-убийц на основе 3D уравнений Навье – Стокса279

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ289

Ильинский Д. А., Рогинский К. А., Ганжа О. Ю. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы «КРАБ» (этап 1)289

Афонин А. Б. Повышения эффективности съемки рельефа дна в акватории Северного морского пути302

Афанасьев А. П., Качанов И. В., Шаталов И. М. Методики определения расстояний осаждения взвешенных частиц при дноуглубительных работах на судоходных реках310

Моргунов К. П., Ивановский Ю. К., Баранов А. Ю. Экспериментальное определение коэффициента шероховатости металлических спиральновитых гофрированных труб323

Гладков Г. Л. Исследование зернистой шероховатости дна речных русел336

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ347

Барышников С. О., Сухотерин М. В., Кныш Т. П. Устойчивость внешних консольных элементов глубоководных аппаратов347

Мартыанов В. В. Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского теплохода пр. Р118359

Султанов Т. Т., Бурнаев З. Р., Тепиева Г. М. Анализ динамического напряженно-деформированного состояния судовых механизмов с упругими анизотропными звеньями369

Том 12. № 2

2020

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырк

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

С. Гуца

Морская академии (г. Щецин, Польша), д.т.н., проф.

Г. В. Егоров

ген. директор ЗАО «Морское инженерное бюро — СПб», д.т.н., проф.

Р. Качиньски

проректор по развитию и сотрудничеству Технического университета (г. Белосток, Польша), д.т.н., проф.

А. И. Пошивай

руководитель Федерального агентства морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов

д.т.н., проф.,

чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов

научный руководитель Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**Члены
редколлегии:**

О. К. Безюков, д.т.н.
А. Т. Беккер, д.т.н.
Н. И. Ватин, д.т.н.
П. А. Гарибин, д.т.н.
Д. П. Голоскоков, д.т.н.
В. А. Жуков, д.т.н.
Ю. М. Искандеров, д.т.н.
О. Г. Каратаев, д.т.н.
В. В. Каретников, д.т.н.
А. В. Кириченко, д.т.н.
М. Н. Кирсанов, д.ф.-м.н.
М. А. Колосов, д.т.н.
Е. А. Королёва, д.э.н.
И. И. Костылев, д.т.н.
А. Л. Кузнецов, д.т.н.
С. Е. Кузнецов, д.т.н.
Е. А. Лаврентьева, д.э.н.
В. А. Логиновский, д.т.н.
В. Е. Марлей, д.т.н.
А. М. Никитин, д.т.н.
Т. А. Пантина, д.э.н.
Л. И. Погодаев, д.т.н.
В. И. Решняк, д.т.н.
В. В. Романовский, д.т.н.
А. В. Саушев, д.т.н.
С. В. Смоленцев, д.т.н.
А. Л. Степанов, д.т.н.
М. В. Сухотерин, д.т.н.
Е. Г. Трунин, к.э.н.
А. Л. Тезиков, д.т.н.
В. Б. Чистов, д.т.н.

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ
И УСТРОЙСТВА381**

Бурков А. Ф., Миханошин В. В., Нгуен Ван Ха. Повышение
эффективности управления комбинированными энергетическими
установками судов381

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....390

Широков Н. В. Метод исключения омонимичных областей в
предупредительном управлении электротехнической системой390

Иванова Т. С., Маларев В. И., Абрамович Б. Н. Применение
сверхпроводящих индуктивных накопителей в энергосети судового
комплекса402

S. O. Baryshnikov
doctor of technical Sciences, Prof.
rector@gumrf.ru

Deputy Editor-in-Chief

A. P. Nyrkov
doctor of technical Sciences, Prof.
NyrkovAP@gumrf.ru

S. Gutsma

Maritime Academy (g.Schetsin,
Poland), doctor of technical Sci-
ences, Prof.

G. V. Yegorov

General Director of "Marine
Engineering Bureau - 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

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

M. Yusupov

scientific leader
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

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 221

Smolentsev S. V., Sazonov A. E., Pelevin A. E. The context importance
in the problem of cooperative maneuvering of unmanned ships 221

Kuznetsov A. L. Matrix method for finding the paths on weighted oriented
graphs in the tasks of port net operational planning 230

Fadyushin S. G. Mathematical description of the quantitative assessment
of decisions making by the navigator 239

Izotov O. A., Vasiliev Y. I., Razhev O. A. Processes for forming groupage
container consignments..... 252

Yuyukin I. V. Geoid approximation by spline functions methods..... 262

Ustinov Y. M., Marinich A. N., Gorobtsov A. P. Determination
of a finite number of ships with the navigation messages mutual exchange
via shipboard equipment of the automatic identification system..... 272

Koptev A. V. Description of the rogue-waves motion based
on 3D Navier-Stokes equations..... 279

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 289

Ilinskiy D. A., Roginskiy K. A., Ganzha O. Y. Seismic survey in the transit
zone. Fullscale tests of the KRAB system. Stage 1 289

Afonin A. B. Improving the hydrographic survey efficiency
in the Northern Sea Route water area 302

Afanas'ev A. P., Kachanov I. V., Shatalov I. M. Methods for determining
the distances of suspended particles sedimentation during dredging
operations on navigable rivers 310

Morgunov K. P., Ivanovsky Yu. K., Baranov A. Yu. Experimental
determination of the roughness coefficient of metal spirally-twisted
corrugated pipes 323

Gladkov G. L. Studying the granular roughness of river channels
bottom 336

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 347

Baryshnikov S. O., Sukhoterlin M. V., Knysh T. P. Stability of external
cantilever elements of deep-sea vehicles 347

Martianov V. V. Assessment of synchronous vibrations risks as exemplified
in the shafting torsional vibrations analysis for R118 project
passenger ship 359

Sultanov T. T., Burnaev Z. R., Tlepiyeva G. M. Analysis of the dynamic
stress-strain state of ship mechanisms with elastic anisotropic links 369

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES..... 381

Burkov A. F., Mikhlanoshin V. V., Nguyen Van Kha. Improving
the management efficiency of combined power plants of ships 381

Editorial Collegium:	
<i>O. K. Bezyukov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. T. Bekker,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>N. I. Vatin,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>P. A. Garibin,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>D. P. Goloskokov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. A. Zhukov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>Y. M. Iskanderov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>O. G. Karatayev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. V. Karetnikov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. V. Kirichenko,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>M. N. Kirsanov,</i>	
doctor of phys.-math. Sciences	
<i>M. A. Kolosov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>Ye. A. Koroleva,</i>	
doctor of economic Sciences	
<i>I. I. Kostylev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. L. Kuznetsov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>S. Ye. Kuznetsov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>Ye. A. Lavrentyeva,</i>	
doctor of economic Sciences	
<i>V. A. Loginovskiy,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. Ye. Marley,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. M. Nikitin,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>T. A. Pantina,</i>	
doctor of economic Sciences	
<i>L. I. Pogodayev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. I. Reshnyak,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. V. Romanovskiy,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. V. Saushev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>S. V. Smolentsev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. L. Stepanov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>M. V. Sukhoterin,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>Ye. G. Trunin,</i>	
candidate of economic Sciences	
<i>A. L. Tezikov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. B. Chistov,</i>	
doctor of technical Sciences	

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS.....	390
<i>Shirokov N. V.</i> Method for eliminating homonymous areas in warning control of the electrical system	390
<i>Ivanova T. S., Malarev V. I., Abramovich B. N.</i> Using superconducting magnetic energy storage in the electric networks of a ship complex.....	402

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-221-229

THE CONTEXT IMPORTANCE IN THE PROBLEM OF COOPERATIVE MANEUVERING OF UNMANNED SHIPS

S. V. Smolentsev¹, A. E. Sazonov¹, A. E. Pelevin²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

The problem of collision avoidance of a group of ships offshore is investigated in the paper. To solve this problem it is necessary to ensure the cooperative maneuvering of several vessels from the group. The case of unmanned (autonomous) ships, when each vessel is operated automatically, is considered in the paper. The main attention is paid to the problem of equally understanding of the current navigation situation conditions by the various agents, jointly solving the problem of cooperative maneuvering in a given water area.

To solve the problem of cooperative maneuvering, all agents operating unmanned ships must equally interpret the current navigational situation. Factors defining the current navigation situation are divided into two groups: the main factors necessary to solve the problem of collision avoidance under ideal conditions and additional factors that must be additionally taken into account when solving the problem of collision avoidance in the real navigation environment. Failure to take into account the additional factors can lead to inadequate decisions on the vessel management.

The concept of context is introduced as a set of interpretations of the additional factors values. The importance of taking these factors into account when solving the problem of collision avoidance is shown. A list of factors, as well as an example of these factors interpretation for inclusion in the context, is given. Using the same context by all agents will allow them to equally interpret the current navigational situation in the navigation area and jointly solve the problem of cooperative maneuvering.

The main properties of the context, such as universality and compactness, are defined. In the protocol of agents interaction, it is necessary to provide the special means for exchange and matching of the contexts between the agents operating unmanned ships.

Keywords: context, unmanned ship, cooperative maneuvering, collision avoidance, COLREG-72.

For citation:

Smolentsev, Sergey V., Anatolii E. Sazonov, and Alexander E. Pelevin. "The context importance in the problem of cooperative maneuvering of unmanned ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 221–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-221-229.

УДК 656.61.052

ЗНАЧЕНИЕ КОНТЕКСТА В ЗАДАЧЕ КООПЕРАТИВНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДОВ

С. В. Смоленцев¹, А. Е. Сазонов¹, А. Е. Пелевин²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматривается проблема безопасного расхождения группы судов в море, для решения которой необходимо обеспечить кооперативное маневрирование нескольких судов из этой группы. Рассматривается ситуация безэкипажных (автономных) судов, когда каждым судном управляет автоматический агент. Основное внимание уделяется проблеме однозначного понимания условий текущей навигационной обстановки.

новки различными агентами, совместно решающими задачу кооперативного маневрирования в заданной акватории. Показано, что для решения задачи кооперативного маневрирования все агенты, управляющие безэкипажными судами, должны одинаково интерпретировать текущую навигационную обстановку. Факторы, определяющие текущую навигационную обстановку, разделены на две группы: основные факторы, необходимые для решения задачи безопасного расхождения в идеальных условиях и дополнительные факторы, которые необходимо учитывать при решении задачи безопасного расхождения в реальной навигационной обстановке. Отказ от учета дополнительных факторов может привести к получению неадекватных решений по управлению судном при расхождении с другими судами.

Вводится понятие «контекста» как множества интерпретаций значений дополнительных факторов. Показана важность их учета при решении задачи безопасного расхождения. Приведен перечень факторов, а также пример их интерпретации для включения в контекст. Использование одинакового контекста всеми агентами позволит им однозначно интерпретировать текущую навигационную обстановку в районе плавания и совместно решать задачу кооперативного маневрирования. Определены основные свойства контекста, такие как универсальность и компактность. Указано, что в протоколе взаимодействия агентов необходимо предусмотреть специальные средства для обмена и согласования контекстов между агентами, управляющими безэкипажными судами.

Ключевые слова: контекст, безэкипажное судно, кооперативное маневрирование, предупреждение столкновений, МППСС-72.

Для цитирования:

Смоленцев С. В. Значение контекста в задаче кооперативного маневрирования безэкипажных судов / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов, А. Е. Пелевин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 221–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-221-229.

Введение (Introduction)

Создание безэкипажного судна в настоящее время является перспективным направлением развития морского транспорта. Проблема эта многогранна, она охватывает многие аспекты автоматизации судовых систем и процессов. Следует заметить, что в данной работе под термином «безэкипажное судно» понимается полностью автономное судно, а не судно, дистанционно управляемое с берега. Одной из важных задач, которую необходимо решать с помощью системы управления такого судна, является задача безопасного расхождения с другими судами в море. Данная задача заключается в следующем: в случае, если суда движутся так, что существует опасность их сближения на дистанцию менее заданной, то одно или несколько судов должны предпринять маневры, исключающие это сближение.

Принципы безопасного расхождения судов в море определены Международными правилами предупреждения столкновения судов — МППСС-72¹ (далее — МППСС). Важно, чтобы решения по расхождению с другими судами, принимаемые автоматически безэкипажным судном, соответствовали МППСС, поскольку безэкипажное судно может расходиться как с другим безэкипажным судном, так и с судном под управлением экипажа. Маневры, предпринятые безэкипажным судном, должны не только приводить к безопасному расхождению, но и быть естественными для восприятия судоводителями встречных судов.

Основные принципы построения интеллектуальных систем управления изложены в работе [1]. Проблема безопасного расхождения судов на основе МППСС рассматривалась в работах [2], [3]. Вопросы формализации МППСС рассмотрены в статье [4]. Работы Вагущенко [5], [6] посвящены использованию интеллектуальных систем в навигации, в том числе и в задачах расхождения судов. Траекторный подход к решению задачи безопасного расхождения судов, учитывающий требования МППСС, предложен в работах [7]–[9].

Различные аспекты задачи оценки навигационной ситуации и принятия решений по безопасному расхождению рассмотрены в предыдущих работах авторов. В них изложены основные принципы и алгоритмы принятия решений, которые могут быть использованы для решения задачи безопасного расхождения в системе управления безэкипажным судном. Однако в море может

¹ Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). 5-е изд. М.: Моркнига, 2011. 142 с.

возникнуть опасная ситуация, когда действиями только одного судна невозможно найти безопасное решение. В этом случае необходимо согласованное маневрирование нескольких судов. Такие действия, проводимые несколькими судами с целью безопасного расхождения, будем называть *кооперативным маневрированием*.

В случае, если такие действия должны проводиться безэкипажными судами, естественно говорить о выработке и реализации коллективного решения группой автоматов, управляющих этими судами. Соответственно для решения этой задачи может быть использована теория мульти-агентных систем. Подобный подход к решению задачи безопасного расхождения был предложен авторами в [10] и далее получил развитие в работе [11]. В этих работах предлагается использовать для управления каждым безэкипажным судном агента. Соответственно кооперативное решение по безопасному расхождению вырабатывается группой агентов, которые должны иметь возможность обмениваться друг с другом информацией. Однако поскольку каждый из агентов самостоятельно проводит оценку текущей навигационной ситуации и вырабатывает решение по расхождению, необходимо чтобы они однозначно интерпретировали эту навигационную ситуацию, т. е. необходим некий *общий базис*, на котором агенты будут строить свои дальнейшие решения. В данной работе рассматривается задача кооперативного маневрирования безэкипажных судов и предлагается такой базис, а также рассматриваются его основные свойства.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Задача безопасного расхождения судна с другим судном или с группой судов решается на основе информации о взаимном расположении судов, векторах их текущих скоростей и статусах. В современных условиях эта информация с достаточной точностью известна, что переводит указанную задачу в класс детерминированных. Однако все это относится к идеальным условиям встречи: открытое море, все суда абсолютно идентичны. Такая ситуация возможна лишь теоретически либо может быть смоделирована на тренажере. В действительности, задачу безопасного расхождения приходится решать в некоторых реальных условиях, отличных от идеальных, которые оказывают существенное влияние на получаемые решения. Таким образом, очевидно, что решения по безопасному расхождению, принимаемые в условиях реальной внешней среды, должны им соответствовать. Совокупность этих условий, которую будем называть *реальной навигационной обстановкой*, состоит из многих факторов, одна часть которых доступна наблюдению, а другая — недоступна. Очевидно, что решения принимаются только на основе известных (наблюдаемых) факторов текущей навигационной обстановки. Прежде всего разделим задачу безопасного расхождения судов на две части:

- *задача А* — оценка опасности реальной навигационной обстановки;
- *задача В* — определение маневра для безопасного расхождения.

Кроме того, совокупность факторов, объединенных понятием «*реальная навигационная обстановка*», разделим на две группы:

- основные факторы, необходимые для решения задачи безопасного расхождения в идеальных условиях и
- дополнительные факторы, которые необходимо дополнительно учитывать при решении задачи безопасного расхождения в реальной навигационной обстановке.

Очевидно, что без знания значений основных факторов невозможно корректное решение задачи безопасного расхождения. В настоящей работе будут рассматриваться дополнительные факторы и их влияние на решение задачи безопасного расхождения.

Определение. *Контекст* — это совокупность интерпретаций наблюдаемых факторов реальной навигационной обстановки, которые необходимо дополнительно учитывать при решении задачи безопасного расхождения.

В приведенном определении важны следующие аспекты:

- в контекст включаются не все факторы, определяющие реальную навигационную ситуацию, а только дополнительные факторы,

– контекст представляет собой не совокупность (множество) факторов или их наблюдаемых значений, а именно интерпретации этих значений.

Последний аспект требует также использования для построения контекста некоторой системы интерпретаций.

Постановка задачи (Formulation of the Problem)

В мире безэкипажного (автономного) судоходства в одной акватории могут находиться несколько безэкипажных судов. В этом случае возникает задача кооперативного маневрирования, т. е. совместного принятия решений агентами, управляющими безэкипажными судами по их безопасному движению. Все агенты находятся в одной и той же реальной навигационной ситуации. Поэтому для решения задач оценки ее безопасности и кооперативного маневрирования важно, чтобы каждый из агентов использовал одинаковое множество факторов, определяющих эту ситуацию, т. е. все агенты должны одинаково интерпретировать реальную навигационную ситуацию, а значит, использовать одинаковый контекст.

Таким образом, основным вопросом, решаемым в данной работе, является создание основ построения контекста реальной навигационной ситуации, который может быть использован агентами, управляющими различными безэкипажными судами для совместного решения задачи кооперативного маневрирования.

Результаты (Results)

Прежде всего необходимо разделить основные и дополнительные факторы, определяющие реальную навигационную ситуацию.

Основными факторами, необходимыми для решения задач оценки навигационной ситуации и безопасного расхождения в идеальных условиях являются количество встречных судов и характеристики каждого встречного судна:

- статус (в терминах Правила 3 МППСС);
- положение относительно других судов;
- вектор движения (курс и скорость).

В современных условиях будем считать, что значения этих факторов с достаточной точностью известны лицу, принимающему решения (в данном случае агенту). Эти значения могут быть получены достаточно надежно путем комплексирования информации от судовых систем ARPA и AIS. Имея эти значения, агент может решить задачу оценки навигационной ситуации и получить решение по безопасному расхождению. Однако даже в этом случае в процессе принятия решения агентом неявно используются следующие предположения о навигационной обстановке, в которой решается задача, т. е. значения дополнительных факторов «по умолчанию»:

- открытое море;
- все суда находятся на виду друг у друга;
- критерии опасности у всех других агентов такие же, как и у данного агента;
- все суда движутся прямолинейно в соответствии с их текущими элементами движения;
- все суда идентичны по своим параметрам, включая динамические характеристики (могут отличаться только их статусы).

Фактически это и есть некоторый нулевой контекст по умолчанию, используемый при отсутствии или игнорировании реальной информации о значениях *дополнительных факторов*. Соответственно использование нулевого контекста приводит к получению решений, неадекватных реальной навигационной обстановке. Это утверждение может быть проиллюстрировано следующим образом.

Предположение о встрече в открытом море, очевидно, может приводить к получению решений по маневрированию, ведущим к навигационным опасностям, выходу за безопасную изолату или входу в запрещенные для плавания районы. Кроме того, даже МППСС предполагает различные действия по расхождению в различных условиях: открытом море, узкостях или СРД.

Предположение об условиях видимости в районе плавания является ключевым, поскольку в различных условиях видимости изменяются логика действий по предотвращению столкновения. В частности, в условиях ограниченной видимости применяется Правило 19 МППСС, в котором не только определяются действия судов, но и отменяются взаимные обязанности судов, установленные Правилем 18 для условий встречи на виду друг у друга. Поскольку рассматривается задача кооперативного расхождения, то очевидно, что каждый из агентов, участвующих в решении данной задачи, должен одинаково понимать складывающиеся в данный момент условия видимости в районе плавания, иначе они не смогут найти адекватное решение.

Предположение об одинаковом значении критериев опасности для разных агентов также является слишком грубым. Прежде всего, сами критерии могут различаться. Например, использование в качестве критерия домена безопасности как некоторой области вокруг судна приводит к различным конфигурациям этих областей. Даже использование простейшего критерия опасности в виде дистанции и времени кратчайшего сближения (домен безопасности — окружность с центром в ЦТ судна) приводит к неоднозначности. Каждый из агентов может использовать собственные значения этих параметров. Это может привести к тому, что одну и ту же навигационную ситуацию разные агенты могут оценивать по-разному. Например, агент судна, которому в данной ситуации сближения должны уступать дорогу, считает ситуацию опасной, а агент судна, которое должно уступать дорогу, считает эту ситуацию не опасной. В этом случае, с точки зрения первого агента, второй агент, не предпринимающий ожидаемых им действий по расхождению, будет нарушать МППСС и вынужден будет сам предпринять действия согласно Правилу 17b, что, в свою очередь, может спровоцировать неадекватные действия второго агента и привести ситуацию к *объективно опасному состоянию*.

Поскольку оценка навигационной ситуации выполняется на основе прогноза движения всех судов в данном районе плавания, важным является корректность этого прогноза. Однако, не имея информации о планируемых маршрутах движения других судов, агент может использовать для прогнозирования траектории движения каждого из них только текущее значение вектора движения этого судна, считая, что на период прогноза оно будет двигаться текущим курсом с текущей скоростью. Такие прогнозы могут не соответствовать реальным траекториям движения судов и, соответственно, будут приводить к неверным оценкам опасности навигационной ситуации и ошибочным решениям по расхождению.

Предположение об идентичности всех судов собственному судну означает использование для прогноза траекторий движения всех окружающих судов модели динамики собственного судна. В случае, если решением агента является маневрирование только собственного судна, это предположение не оказывает никакого отрицательного влияния. Однако, поскольку речь идет о кооперативном маневрировании, в этом случае полученное агентом решение по безопасному расхождению может предусматривать маневрирование встречных судов. В этом случае использование для расчета траектории движения другого судна модели динамики собственного судна приводит к неадекватности данного решения. Более того, поскольку речь идет о кооперативном принятии решений, результаты, полученные в одной и той же ситуации разными агентами (использующими для всех других судов модель динамики собственного судна), будут существенно различаться и согласовать их будет достаточно проблематично. Таким образом, контекст должен содержать следующие сведения о районе плавания:

- тип района;
- текущие условия видимости,

а также следующую информацию обо всех находящихся в этом районе судах:

- критерии оценки уровня опасности агентом;
- предпринимаемый маневр;
- планируемый маршрут;
- тип судна;
- размерения;
- динамические характеристики.

Эта информация (контекст) должна однозначно определять текущие условия в районе плавания и используется агентами при решении задачи безопасного расхождения. Поскольку данная задача решается совместно, то и контекст, используемый различными агентами, должен быть идентичным. Таким образом, контекст может быть формализован следующим образом:

$$C = \{C^r, \bigcup_{i \in I} C_i^s\},$$

где C^r — контекст района плавания;

C_i^s — контекст i судна в районе плавания;

I — множество судов в районе плавания.

Обсуждение (Discussion)

Поскольку контекст текущей навигационной обстановки должен использоваться всеми агентами, которые находятся в районе плавания, обмен этой информацией должен быть частью протокола взаимодействия агентов при решении задачи кооперативного маневрирования. Поэтому он должен обладать следующими важными свойствами: быть универсальным и компактным.

Свойство *универсальности* требует применения однотипных данных в контексте, который используют все агенты, а *компактность* этих данных позволит быстрее проводить обмен контекстами между агентами. Таким образом, как отмечалось ранее, в контекст должны входить не значения факторов, а их интерпретации. При этом ключевым вопросом является использование всеми агентами некоторой общей базы интерпретаций, в которой будут представлены значения факторов. База интерпретаций должна предоставить для каждого фактора, учитываемого в контексте, конечное множество вариантов, которые могут быть легко и компактно закодированы и переданы всем агентам.

Для указанных ранее элементов контекста может быть предложена база интерпретаций с использованием следующих обозначений:

$\langle \dots, \dots, \dots \rangle$ — перечисление вариантов значения;

$(\dots, \dots, \dots)$ — список совместно используемых значений.

О районе плавания:

– тип района: $\langle \text{OPENSEA}, \text{NARROW}, \text{TSS} \rangle$,

в данном случае используется перечень районов плавания, для которых в МППСС предусмотрены различные правила маневрирования;

– текущие условия видимости $\langle \text{CLEAR}, \text{FOG} \rangle$,

в данном случае используется перечень условий, для которых в МППСС предусмотрены различные правила маневрирования.

О каждом судне:

– критерии оценки уровня опасности агентом = $(\text{CPA}, \text{TCPA})$,

в данном случае используется домен безопасности в виде окружности с центром в ЦТ судна, поэтому в качестве критерия безопасности выступает пара: дистанция кратчайшего сближения – время кратчайшего сближения;

– предпринимаемый маневр = $\langle \text{NO}, (\text{TURN}, \text{COURSE}), (\text{ENGINE}, \text{SPEED}) \rangle$,

в данном случае используется перечень вариантов маневра: отсутствие маневра, маневр курсом или скоростью, для маневра курсом указывают новый курс, для маневра скоростью — новую скорость;

– планируемый маршрут = $((F, L, V) \dots)$,

используется список маршрутных точек с указанием координат маршрутной точки и скорости на новом участке маршрута, в котором передаются маршрутные точки на заданный период (например, час) вперед + следующая маршрутная точка за пределами этого периода;

– тип судна = $\langle \text{TYPE1}, \text{TYPE2}, \dots \rangle$,

тип судна передается в сообщениях AIS и, соответственно, необходимо использовать типы, определяемые в стандарте AIS;

– размерения = (L, B, T),

размерения судна передаются в сообщениях AIS;

– динамические характеристики = (S0, R1, A1, W1, R2, A2, W2, ALFA),

где перечислены параметры упрощенной модели динамики судна, описанной в источнике [12], которые позволяют построить прогноз траекторию движения судна при различных маневрах курсом или скоростью. В случае использования других моделей перечень параметров может быть иным.

Следует отметить, что база интерпретаций может содержать в себе некоторую базу данных, в которой могут быть связаны варианты: тип судна — размерения с динамическими характеристиками судов данного типа и размерений. В этом случае можно отказаться от включения в контекст вектора динамических характеристик каждого из встречных судов, используя только их тип и размерения, которые передаются средствами AIS, но в этом случае важно наличие и идентичность таких баз данных у каждого агента.

Заключение (Conclusion)

В статье рассмотрены особенности решения задачи кооперативного маневрирования для обеспечения безопасного расхождения судов в море, в частности проблема однозначного понимания условий текущей навигационной обстановки различными агентами, совместно решающими задачу кооперативного маневрирования в заданной акватории.

Предложено использовать для этого контекст, который содержит интерпретации условий текущей навигационной обстановки. Использование одного контекста всеми агентами позволяет им одинаково понимать текущие условия. Предложено содержание контекста, однако очевидно, что его содержание может быть дополнено интерпретациями других дополнительных факторов, которые могут быть использованы при решении задачи безопасного расхождения (например, гидрометеофакторами). Вместе с тем открытым остается вопрос формирования контекста для навигационной ситуации в акватории с пространственной неоднородностью условий (например, различных условиях видимости в разных частях акватории). В этом случае, видимо, необходимо использовать составной контекст, что является темой дополнительных исследований. Кроме того, в статье не рассматривалась проблема согласования контекста между агентами, которая должна являться составной частью протокола общения агентов при кооперативном маневрировании и ее обсуждение выходит за рамки настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев С. Н.* Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев [и др.]. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.
2. *Johansen T. A.* Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment / T. A. Johansen, T. Perez, A. Cristofaro // IEEE transactions on intelligent transportation systems. — 2016. — Vol. 17. — Is. 12. — Pp. 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.
3. *Woerner K. L.* Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles / K. L. Woerner [et al.]. // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. — IEEE, 2016. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413.
4. *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.
5. *Вагущенко Л. Л.* Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
6. *Вагущенко Л. Л.* Мультиагентный подход к решению задач расхождения судов / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко // Судовождение. — 2008. — № 15. — С. 35–43.
7. *Dmitriev S. P.* Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework / S. P. Dmitriev, N. V. Kolesov, A. V. Osipov // IFAC Proceedings Volumes. — 2000. — Vol. 33. — Is. 21. — Pp. 373–377. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37103-3.

8. Дмитриев С. П. Автоматический синтез траекторий движения как средство интеллектуальной поддержки судоводителя / С. П. Дмитриев [и др.] // Гирскопия и навигация. — 2001. — № 3 (34). — С. 19–31.
9. Дмитриев С. П. Система интеллектуальной поддержки судоводителя при расхождении судов / С. П. Дмитриев [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2003. — № 2. — С. 98–105.
10. Смоленцев С. В. Формализация задачи расхождения судов в море на основе теории мультиагентной системы / С. В. Смоленцев // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 2 (64). — С. 19–24.
11. Смоленцев С. В. Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов, Ю. М. Искандеров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.
12. Смоленцев С. В. Простая аналитическая модель движения судна / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.

REFERENCES

1. Vasilev, S. N., et al. *Intellectualnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami*. M.: Fizmatlit, 2000.
2. Johansen, Tor Arne, Tristan Perez, and Andrea Cristofaro. “Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment.” *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 17.12 (2016): 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780
3. Woerner, K. L., M. R. Benjamin, M. Novitzky, and J.J. Leonard. “Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles.” *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*. IEEE, 2016. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413
4. Cymbal, N. N., and R. Ju. Buzhbeckij. “Formalizacija MPPSS-72 v chasti koordinacii vzaimodejstvija sudov pri rashozhdenii.” *Sudovozhdenie* 12 (2006): 124–129.
5. Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. *Podderzhka reshenij po rashozhdeniju s sudami*. Odessa: Feniks, 2010.
6. Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. “Multiagentnyj podhod k resheniju zadach rashozhdenija sudov.” *Sudovozhdenie* 15 (2008): 35–43.
7. Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, and A. V. Osipov. “Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework.” *IFAC Proceedings Volumes* 33.21 (2000): 373–377. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37103-3
8. Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, A. V. Osipov, and G. N. Romanycheva. “Avtomaticeskij sintez traektorij dvizhenija kak sredstvo intellektual’noj podderzhki sudovoditelja.” *Gyroscopy and Navigation* 3(34) (2001): 19–31.
9. 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.
10. Smolentsev, S. V. “Formalization of the ships’ collision avoidance at sea on the basis of MAS theory.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(64) (2011): 19–24.
11. Smolentsev, Sergey V., Anatolii E. Sazonov, and Yurii M. Iskanderov. “Cooperative maneuvering of unmanned ships for collision avoidance at sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.
12. Smolentsev, Sergey V., and Dmitry V. Isakov. “A simple analytical model of ship movement.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smolentsev, Sergey V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru

Сазонов Анатолий Ефимович —

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С.О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_avt@gumrf.ru

Пелевин Александр Евгеньевич —

доктор технических наук,

ведущий научный сотрудник

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

197046, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Малая Посадская, 30

e-mail: apelevin@eprib.ru, aepelevin@mail.ru

Sazonov, Anatolii E. —

Dr. of Technical Sciences, professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,

Russian Federation

e-mail: kaf_avt@gumrf.ru

Pelevin, Alexander E. —

Dr. of Technical Sciences,

Leading Researcher

Concern CSRI Elektropribor, JSC

30, Malaja Posadskaja Str., St. Petersburg,

197046, Russian Federation

e-mail: apelevin@eprib.ru, aepelevin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 января 2020 г.

Received: January 24, 2020.

MATRIX METHOD FOR FINDING THE PATHS ON WEIGHTED ORIENTED GRAPHS IN THE TASKS OF PORT NET OPERATIONAL PLANNING**A. L. Kuznetsov**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Network planning, or network analysis, is a class of application methods for project management that provides planning, analysis of deadlines (both early and late), risk of project failure or individual parts of the project. These methods allow you to link the performance of different works and processes over time, to make an operational schedule of the project, to get a forecast of the total duration of the project. In the modern practice of designing, building and managing seaports, network planning represents the most sought-after toolkit for decision makers. Network planning methods are conditionally divided into deterministic (Gant's diagrams, rigid and with additional time-lag, critical path method, etc.) and probabilistic. Latter, in turn, are divided into non-alternative (method of statistical tests or the Monte Carlo method, the method of evaluating and revising PERT plans) and alternative (GERT graphic assessment method).

In many applications, the basis of the used method is to find a path on the graph. Multiple repetition of experiments, characteristic of the most effective probabilistic methods, imposes high demands to reduce the computational laboriousness of the used algorithms. In addition, the different nature of cause-and-effect relations between objects of network models leads to the formation of such a structure depicting graph processes, which do not allow the use of most known algorithms. A matrix algorithm for finding paths on weighted oriented graphs, characterized by low computational laboriousness, simplicity and visibility, and allowing different types of cause-effect relations between events, is described in the paper. The proposed algorithm is effective in terms of the set tasks, and its implementation is almost no different from the pseudo-code used to describe it.

This makes it easy to implement, easy to debug and verify code, and easy to embed the algorithm in various network planning applications. One of these tasks is to find critical paths in the context of the time parameters of all works (operations) linking the tops of events.

Keywords: network planning, graph search, simulation techniques.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L. "Matrix method for finding the paths on weighted oriented graphs in the tasks of port net operational planning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.

УДК 656.615**МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ПОИСКА ПУТЕЙ НА ВЗВЕШЕННЫХ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ГРАФАХ В ЗАДАЧАХ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МОРСКИХ ПОРТОВ****А. А. Кузнецов**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что сетевое планирование, или сетевой анализ, представляет собой класс прикладных методов управления проектами, обеспечивающих планирование, анализ сроков выполнения (как ранних, так и поздних), риска невыполнения проекта или его отдельных частей. Данные методы позволяют увязать выполнение различных работ и процессов во времени, составить операционный график выполнения проекта, получить прогноз общей продолжительности реализации всего проекта. В современной практике проектирования, строительства и управления морскими портами сетевое планирование представляет наиболее востребованный инструментальный лиц, принимающих решение. Методы сетевого планирования условно подразделяются на детерминированные (диаграммы Ганта, жесткие и с дополнительным временным люфтом, метод критического пути и др.) и вероятностные. Последние, в свою очередь, делят-

ся на неальтернативные (метод статистических испытаний или метод Монте-Карло, метод оценки и пересмотра планов PERT) и альтернативные (метод графической оценки и анализа GERT). Во многих приложениях основу используемого метода составляет поиск пути на графе. Многократное повторение экспериментов, характерное для наиболее эффективных вероятностных методов, предъявляет высокие требования к снижению вычислительной трудоемкости используемых алгоритмов. Кроме того, различный характер причинно-следственных связей между объектами сетевых моделей приводит к формированию такой структуры изображающего процессы графа, которые не позволяют применять большинство известных алгоритмов.

В данной статье описывается матричный алгоритм поиска путей на взвешенных ориентированных графах, отличающийся низкой вычислительной трудоемкостью, простотой и наглядностью, а также допускающий различные виды причинно-следственных связей между составными событиями. Предложенный алгоритм является результативным в отношении поставленных задач, а его реализация практически не отличается от псевдокода, использованного для его описания, что обеспечивает легкость реализации, простоту отладки и верификации кода, легкость встраивания алгоритма в различные прикладные задачи сетевого планирования. Одной из таких задач является нахождение критических путей в условиях разброса временных параметров всех работ (операций), связывающих между собой вершины-события.

Ключевые слова: сетевое планирование, поиск путей на графе, методы имитационного моделирования.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Матричный метод поиска путей на взвешенных ориентированных графах в задачах сетевого планирования при проектировании и эксплуатации морских портов / А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.

Введение (Introduction)

Ключевой целью сетевого планирования в управлении является сокращение продолжительности проекта при условии сохранения параметров качества и объема продукции. Сложность, комплексность и капиталоемкость задач проектирования, строительства и управления развитием морских портов делает данный научный инструмент одним из основных средств при создании этих важнейших элементов транспортной инфраструктуры.

Методики сетевого планирования появились впервые в 50-е гг. в США [1]. В 1956 г. поиски наиболее эффективного использования вычислительной машины *Univac* привели к привлечению ее для составления планов-графиков крупных комплексов работ по модернизации заводов фирмы «Дюпон». Результатом исследований явился рациональный и простой метод описания проекта, который получил название *метода критического пути* — МКП или СРМ (*Critical Path Method*) [2], [3].

Параллельно в научных лабораториях ВМС США появился *метод анализа и оценки программ* — PERT (*Program Evaluation and Review Technique*), использованный при реализации проекта разработки ракетной системы «Поларис» [4], [5]. Руководство программой с использованием нового средства оказалось настолько успешным, что проект был завершен на два года раньше запланированного срока. Как следствие, этот метод управления начал использоваться для планирования всех проектов, выполняемых вооруженными силами США [6], [7]. Вскоре подобную методику начали применять и крупные гражданские промышленные корпорации [8], [9]. По существу, значительный выигрыш по времени реализации проектов явился результатом применения математических методов управления сложными комплексами работ, что стало возможным лишь благодаря развитию вычислительной техники.

Первоначально крупные корпорации осуществляли самостоятельную разработку программного обеспечения, но вскоре первые системы управления проектами появились и на рынке публичного программного обеспечения. Бурное развитие систем управления проектами началось с появлением персональных компьютеров, быстро ставших рабочим инструментом широкого круга руководителей. Резкое расширение круга применения обусловило потребность в создании систем управления проектами нового типа, в которых важнейшим показателем являлись

простота использования. Управленческие системы нового поколения стали восприниматься как средство управления проектом, понятное любому менеджеру, не требующее специальной подготовки, обеспечивающее простое «включение» в работу. С расширением круга пользователей систем проектного менеджмента происходит развитие методических приемов их использования. Отечественные и зарубежные отраслевые журналы регулярно публикуют статьи, посвященные системам управления проектами, содержащие советы пользователям таких систем и анализ использования методики сетевого планирования для решения задач в различных сферах управления.

Применение методологии сетевого планирования в управлении требует структуризации операций по отрезкам времени и группировки последовательно-параллельных операций для оптимизации хода выполнения всего проекта. На основе этого осуществляется построение схемы, в которую сводятся все значимые данные по каждой операции в соответствии с их формализованной структурой и группами параллельных операций. Результатом является построение сетевой диаграммы, дающей возможность системного представления всех операций и создающих условия для управления процессом реализации проекта.

Сетевое планирование ориентировано в первую очередь на минимизацию продолжительности проекта с применением двух основных методов: *метода критического пути* и *метода пересмотра планов*. Критическим называется максимальный по продолжительности полный путь в сети; работы, лежащие на этом пути, также называются *критическими*. Длительность критического пути определяет наименьшую общую продолжительность работ по всему проекту [10]. Метод оценки и пересмотра планов заключается в обеспечении соблюдения графиков выполнения работ, составляющих проект. Для этого осуществляется его декомпозиция на ряд подзадач, для каждой из которых назначается время и приоритет ее выполнения. В зависимости от приоритета задач и их влияния на весь проект предпринимаются необходимые действия для снижения продолжительности проекта. Во всех случаях основу большинства методов и их вариантов составляют базовые алгоритмы нахождения кратчайших путей во взвешенных графах. К их числу относятся алгоритмы Флойда – Уоршелла [11], Форда – Беллмана [12], классический алгоритм Дейкстры [13], алгоритм Дейкстры для разреженных графов [14], [15].

В то же время указанные алгоритмы отличаются достаточно высокой вычислительной трудоемкостью, сложностью программной реализации и невозможностью работы с различными типами причинно-следственных связей. В данной публикации предлагается описание общей идеи, реализация и примеры использования матричного алгоритма поиска пути на взвешенных графах произвольной природы, который представляется свободным от части этих недостатков.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Сетевая диаграмма проектных событий и работ, называемых в портовых проектах *операциями*, обычно представляется в виде ориентированного графа, вершинами которого являются события, а дугами — элементарные операции, выполнение которых связывает предшествующее событие с последующим. У каждого события может быть несколько «предшественников», которые могут приводить к наступлению данного события по разным сценариям: И / ИЛИ. Событие, связанное с предшествующими по ИЛИ, случается тогда, когда выполняется одна из предшествующих операций. Событие, связанное с предшествующими по И, случается тогда, когда выполняются все предшествующие операции. Примером условия И может быть процедура подготовки складской бригады к затарке контейнера: бригада должна осмотреть контейнер и сверить данные о грузе с документами (рис. 1).

Примером условия ИЛИ может служить процедура погрузки контейнера на автомобиль: контейнер будет погружен на автомобиль RTG или RS в зависимости от того, какая из машин окажется ближе к соответствующей секции (рис. 2).

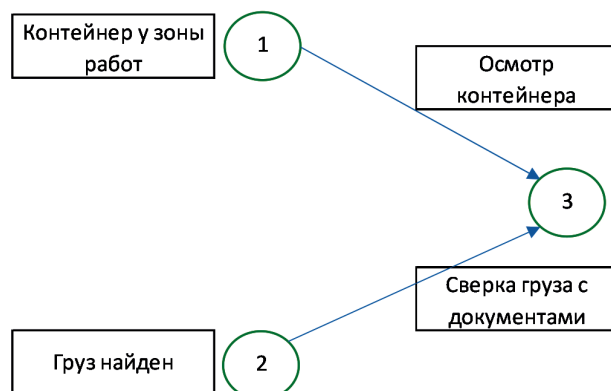


Рис. 1. Пример условия И:
подготовка бригады к началу операции

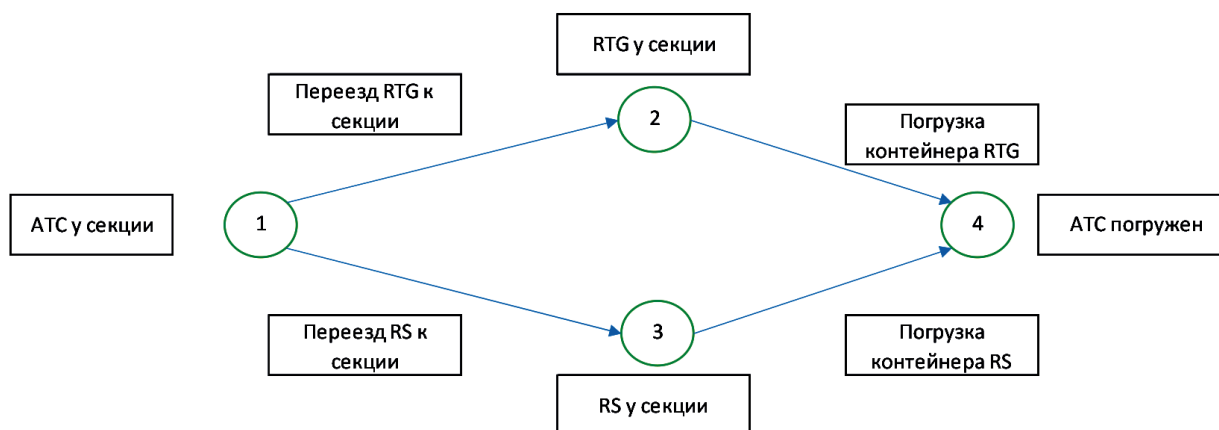


Рис. 2. Пример условия ИЛИ:
погрузка автомобиля

Каждое свершившееся событие характеризуется временем наступления. Каждая операция, связывающая событие-предшественник с событием-последователем, характеризуется длительностью. Событие-последователь в случае ИЛИИ наступает в самый ранний момент времени, определяемый любым событием-предшественником. Событие-последователь в случае И наступает в самый поздний момент времени, определяемый всеми событиями-предшественниками. До начала отдельного эксперимента проводится генерация случайных значений длительности всех операций, связывающих между собой все события. В начальный момент времени свершившимися считаются одно или несколько событий. Далее для всех остальных событий проверяется выполнение связей по схеме И или ИЛИИ и результирующим событиям присваивается статус свершившихся в момент времени, определяемый наступлением событий-предшественников с учетом длительности операции и схем И или ИЛИИ.

Самое раннее событие по схеме ИЛИИ или самое позднее по схеме И фиксируется для каждого нового свершившегося события. Если достигнута конечная вершина, то процесс прямого распространения считается законченным, в противном случае этот процесс повторяется. После завершения процесса прямого распространения по сформированным ссылкам выполняется обратный ход для нахождения критического пути при данном наборе значений длительности операций.

Результаты (Results)

Пусть ориентированный граф последовательности операций представлен K событиями. Наличие направленного ребра от вершины i к j обозначим как r_{ij} . Вершина e_i в этом случае называется *предшествующей для вершины e_j* , а вершина e_j — *последующей для вершины e_i* .

Граф может быть полностью определен несколькими способами: графически, матрично, списком. Матрицей смежности ориентированного графа называется квадратная таблица с ненулевым элементом r_{ij} в случае, если имеется направленное ребро от вершины i к j , т. е. $R = r_{ij}$, и нулевым элементом в противоположном случае. Например, для показанного на рис. 3 направленного графа операций матрица смежности будет выглядеть в виде, приведенном на рис. 4.

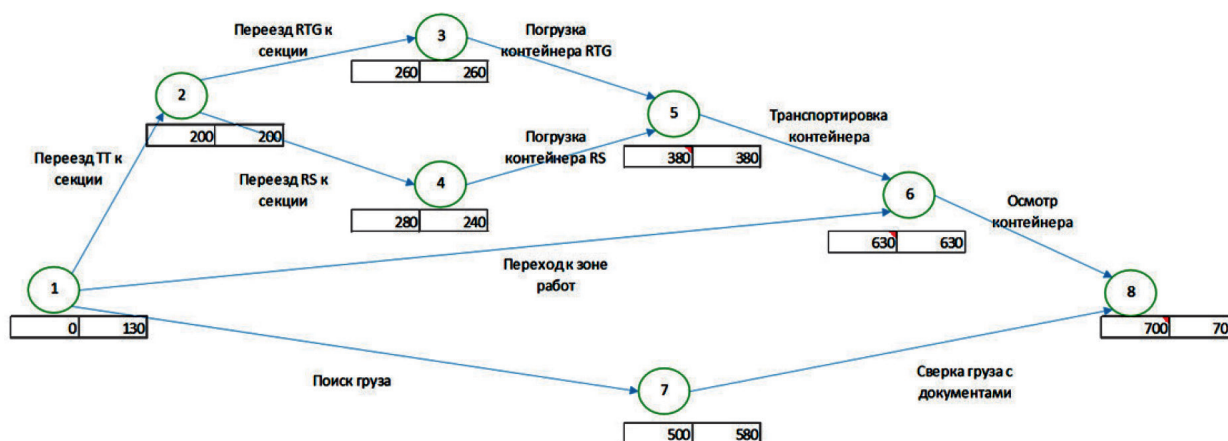


Рис. 3. Граф операций

	j	1	2	3	4	5	6	7	8
i	1		1	0	0	0	1	1	0
	2	0	0	1	1	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	1	0	0	0
	4	0	0	0	0	1	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	1	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	1
	7	0	0	0	0	0	0	0	1
	8	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 4. Матрица смежности графа операций

Причинно-следственные связи между элементарными событиями представлены двумя квадратными матрицами связи: по И и по ИЛИ. По сути, они являются матрицами смежности: каждая из них показывает, что для наступления события e_j необходимо наступление тех или иных предшествующих событий r_{ij} .

В случае матрицы смежности типа ИЛИ для наступления события e_j достаточно наступления хотя бы одного предшествующего события. Обозначим эту матрицу как $O = o_{ij}$. В случае матрицы смежности типа И для наступления события e_j необходимо наступление всех предшествующих событий. Обозначим эту матрицу как $A = a_{ij}$. Очевидно, что указанные матрицы являются разными интерпретациями одного и того же представления матрицы связности графа $R = r_{ij}$.

Пусть в начальный момент времени состояние событий описывается вектором-строкой e_{j0} , $j = \overline{1, K}$; $e_j \in \{0, 1\}$. Если $e_j = 1$, то соответствующее событие считается случившимся. В следующую итерацию логического вывода для матрицы ИЛИ состояние событий будет определяться новым вектором-строкой e_{j1} , в котором фиксируемое наступление событий будет определяться состояни-

ем событий предшествующей итерации e_{j_0} и их связями с текущими событиями. Для того, чтобы получить эту связь, введем операцию логического произведения матриц и векторов в виде их частного случая. Логическим произведением двух матриц: $X = x_{ij}$ и $Y = y_{ij}$, будем называть новую матрицу $Z = z_{ij}$, элементы которой определяются как $z_{ij} = \bigcup_{m=1}^K x_{im} \cap y_{mj}$.

Пусть теперь в начальный момент времени состояние событий описывается вектором-строкой e_{j_0} : $j = \overline{1, K}$; $e_j \in 0, 1$ и если $e_j = 1$, то соответствующее событие считается случившимся. Рассмотрим произведение слева от исходного вектора-строки e_{j_0} на матрицу смежности, или $e_j = e_{j_0} \times o_{ij}$. По введенному ранее определению операции логического произведения матриц и векторов запишем $\|e_j\| = \left\| \bigcup_{m=1}^K e_m \cap r_{mj} \right\|$. Отдельный член $e_m \cap r_{mj}$ в случае истинности показывает, что событию e_j в данной итерации предшествует свершившееся событие e_m , связанное с событием e_j причинно-следственной связью r_{mj} , т. е. являющееся его свершившимся предшественником. Полученный вектор показывает события, состоявшиеся на этой итерации. Для регистрации текущего состояния их надо объединить с ранее наступившими событиями, т. е. $\|e_j\|_1 = \left\| \bigcup_{m=1}^K e_m \cap r_{mj} \right\|_1 \cup \|e_j\|_0$. Аналогично каждый следующий шаг итерации будет описываться как $e_{j_n} = e_{j_{n-1}} \times o_{ij} \cup e_{j_{n-1}}$. Поскольку максимальный по длине путь на графе не превышает полного числа вершин K , путь в конечную вершину будет найден как число итераций, не превышающих этого значения.

На рис. 5, а показаны соответствующие вектора-строки состояний для приведенного примера и интерпретации графа по схеме ИЛИ, откуда видно, что конечное событие 8 наступает после выполнения второй итерации, после чего состояния событий перестают меняться. На рис. 5, б показаны соответствующие вектора-строки состояний для приведенного примера, но входящие ребра интерпретируются по схеме И, т. е. требуют для наступления выполнения не одного, а всех событий-предшественников. В этом случае конечное событие 8 наступает после выполнения пятой итерации.

а)

ИЛИ	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	1	1	0
2	1	1	1	1	0	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1

б)

И	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	1	0
2	1	1	1	1	0	0	1	0
3	1	1	1	1	1	0	1	0
4	1	1	1	1	1	1	1	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1

Рис. 5. Векторы состояний:

а — для итераций по схеме ИЛИ; б — для итераций по схеме И

Вообще, умножение единичного вектора-строки на матрицу смежности не по логическим правилам, а по правилам обычных матричных операций дает вектор-строку количества предшествующих событий (см. рис. 6, а). Умножение полученного на каждой итерации вектора-строки текущего состояния на матрицу смежности по обычным правилам умножения матриц дает количество событий, наступивших к этому моменту (рис. 6, б). Как видно из данного рисунка, текущее состояние задачи на пятой итерации совпадает с исходным вектором числа предшествующих событий, что свидетельствует о выполнении всех условий наступления событий как по схеме ИЛИ, так и по схеме И.

а)

Вектор числа предшественников							
0	1	1	1	2	2	1	2

б)

	Вектор числа предшественников							
	0	1	1	1	2	2	1	2
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	0	0	0	1	1	0
2	0	1	1	1	0	1	1	1
3	0	1	1	1	2	1	1	1
4	0	1	1	1	2	2	1	1
5	0	1	1	1	2	2	1	2
6	0	1	1	1	2	2	1	2

Рис. 6. Вектор количества предшествующих событий (а);
вектор количества событий, наступивших к определенному моменту (б)

Наступление нового события e_j на каждой итерации позволяет фиксировать момент его наступления T_j : при использовании матрицы смежности ИЛИ таким моментом является самый ранний момент появления предпосылки к его наступлению. Этим моментом является минимальная сумма момента наступления T_i некоторого события-предшественника e_j и длительности реализации причинно-следственной связи r_{ij} , которую будем обозначать t_{ij} . Иными словами, имеем $T_j = \min_i (T_i + t_{ij})$. Моменты наступления событий фиксируются в матрице T (рис. 7, а).

а)

ИЛИ	1	2	3	4	5	6	7	8
0	100	0	0	0	0	0	0	0
1	100	120	0	0	0	155	144	0
2	100	120	150	160	0	155	144	166
3	100	120	150	160	167	155	144	166
4	100	120	150	160	167	155	144	166

б)

И	1	2	3	4	5	6	7	8
0	100	0	0	0	0	0	0	0
1	100	120	0	0	0	0	144	0
2	100	120	150	160	0	0	144	0
3	100	120	150	160	187	0	144	0
4	100	120	150	160	187	231	144	0
5	100	120	150	160	187	231	144	264
6	100	120	150	160	187	231	144	264

Рис. 7. Матрица моментов наступления событий:
а — по ИЛИ; б — по И

При использовании матрицы смежности типа И моментом наступления события будет являться не самый ранний, а самый поздний момент наступления события из всей комбинации требуемых для наступления события предшественников, т. е. $T_j = \max_i (T_i + t_{ij})$. Моменты наступления событий фиксируются в матрице T (рис. 7, б).

Путь по ИЛИ	Путь по И
1-7-8	1-2-4-5-6-8

Рис. 8. Результаты поиска пути по алгоритмам для матриц ИЛИ и И

В результате на каждом шаге итерационного процесса текущее состояние событий e_{kn} дополняется вектором-моментом их наступления T_{kn} . Кроме того, послужившее «реальным активатором» событие — самое раннее для матрицы ИЛИ и самое позднее для матрицы И — записывается в строку следа s_{kn} для последующего построения критического пути из конечной в начальную точку. На рис. 8 показаны найденные для матриц смежности разного типа критические пути.

Заключение (Conclusion)

Предложенный алгоритм действительно является результативным в отношении поставленных задач, а его реализация практически не отличается от псевдокода, использованного для его описания. Это обстоятельство обеспечивает легкость реализации, простоту отладки и верификации кода, легкость встраивания алгоритма в различные прикладные задачи сетевого планирования. Одной из таких задач является нахождение критических путей в условиях разброса временных параметров всех работ (операций), связывающих между собой вершины-события. Для получения статистически достоверных данных о критических путях (возможно, различных при различных сочетаниях длительностей выполнения работ) и формирования надежных вероятностных оценок их параметров требуется проведение обширных объемов испытаний, в которых низкая вычислительная трудоемкость предложенного метода может оказаться полезной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев Е. М. Project 2003. Сетевое планирование и управление проектами / Е. М. Кудрявцев. — М.: ДМК Пресс, 2014. — 240 с.
2. Woolf M. B. CPM Mechanics: The Critical Path Method of Modeling Project Execution Strategy / M.B. Woolf. — ICS-Publications, 2012. — 480 p.
3. Kelley Jr J. E. Critical-path planning and scheduling / J. E. Kelley Jr, M. R. Walker // IRE-AIEE-ACM '59 (Eastern). — New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 1959. — С. 160–173. DOI: 10.1145/1460299.1460318.
4. Burgelman J. Computing project makespan distributions: Markovian PERT networks revisited / J. Burgelman, M. Vanhoucke // Computers & Operations Research. — 2019. — Vol. 103. — Pp. 123–133. DOI: 10.1016/j.cor.2018.10.017.
5. Newell M. The Project Management Question and Answer Book / M. Newell, M. Grashina. — American Management Association, 2003. — 98 p.
6. Washburn A. Military operations research / A. Washburn // Handbooks in Operations Research and Management Science. — 1994. — Vol. 6. — Pp. 67–106. DOI: 10.1016/S0927-0507(05)80085-4.
7. Thayer H. Management of the Hanford Engineer Works in World War II: How the Corps, DuPont and the Metallurgical Laboratory fast tracked the original plutonium works / H. Thayer. — ASCE Press, 1996. — 224 p. DOI: 10.1061/9780784401606.
8. Ali I. Isolating critical flow path and algorithmic partitioning of the AND/OR mobile workflow graph / I. Ali, S. Bagchi // Future Generation Computer Systems. — 2020. — Vol. 103. — Pp. 28–43. DOI: 10.1016/j.future.2019.09.059.
9. Burgelman J. Computing project makespan distributions: Markovian PERT networks revisited / J. Burgelman, M. Vanhoucke // Computers & Operations Research. — 2019. — Vol. 103. — Pp. 123–133. DOI: 10.1016/j.cor.2018.10.017.

10. Baker S. L. Critical Path Method (CPM) / S. L. Baker. — University of South Carolina, Dept. of Health Services Policy and Management Courses and Curricula, HSPM J716, 2004.
11. Bellman R. On a routing problem / R. Bellman // Quarterly of applied mathematics. — 1958. — Vol. 16. — Is. 1. — Pp. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.
12. Ford Jr. L. R. Flows in Networks / L. R. Ford Jr., D. R. Fulkerson. — Princeton University Press, 1962. — 212 p.
13. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs / E. W. Dijkstra // Numerische mathematik. — 1959. — Vol. 1. — Pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
14. Кормен Т. Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. — 2-е изд. — М.: «Вильямс», 2006. — 1296 с.
15. Левитин А. В. Жадные методы: Алгоритм Дейкстры / А. В. Левитин // Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. — М.: Вильямс, 2006. — С. 189–195.

REFERENCES

1. Kudryavtsev, E. M. *Project 2003. Setevoe planirovanie i upravlenie proektami*. M.: DMK Press, 2014.
2. Woolf, Murray B. *CPM Mechanics: The Critical Path Method of Modeling Project Execution Strategy*. ICS-Publications, 2012.
3. Kelley Jr, James E., and Morgan R. Walker. “Critical-path planning and scheduling.” *IRE-AIEE-ACM '59 (Eastern)*. New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 1959. 160–173. DOI: 10.1145/1460299.1460318.
4. Burgelman, Jeroen, and Mario Vanhoucke. “Computing project makespan distributions: Markovian PERT networks revisited.” *Computers & Operations Research* 103 (2019): 123–133. DOI: 10.1016/j.cor.2018.10.017.
5. Newell, Michael, and Marina Grashina. *The Project Management Question and Answer Book*. American Management Association, 2003.
6. Washburn, Alan. “Military operations research.” *Handbooks in Operations Research and Management Science* 6 (1994): 67–106. DOI: 10.1016/S0927-0507(05)80085-4
7. Thayer, Harry. *Management of the Hanford Engineer Works in World War II: How the Corps, Dupont and the Metallurgical Laboratory fast tracked the original plutonium works*. ASCE Press, 1996. DOI: 10.1061/9780784401606.
8. Ali, Ihtisham, and Susmit Bagchi. “Isolating critical flow path and algorithmic partitioning of the AND/OR mobile workflow graph.” *Future Generation Computer Systems* 103 (2020): 28–43. DOI: 10.1016/j.future.2019.09.059.
9. Burgelman, Jeroen, and Mario Vanhoucke. “Computing project makespan distributions: Markovian PERT networks revisited.” *Computers & Operations Research* 103 (2019): 123–133. DOI: 10.1016/j.cor.2018.10.017.
10. Baker, Samuel L. *Critical Path Method (CPM)*. University of South Carolina, Dept. of Health Services Policy and Management Courses and Curricula, HSPM J716, 2004.
11. Bellman, Richard. “On a routing problem.” *Quarterly of applied mathematics* 16.1 (1958): 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.
12. Ford Jr., Lester Randolph, and D. R. Fulkerson. *Flows in Networks*. Princeton University Press, 1962.
13. Dijkstra, Edsger W. “A note on two problems in connexion with graphs.” *Numerische mathematik* 1 (1959): 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
14. Kormen, Tomas Kh., Charl’z I. Leizeron, Ronal’d L. Rivest, and Klifford Shtain. *Algoritmy: postroenie i analiz*. 2nd ed. M.: «Vil’yams», 2006.
15. Levitin, A. V. “Zhadnye metody: Algoritm Deikstry.” *Algoritmy. Vvedenie v razrabotku i analiz*. M.: Vil’yams, 2006. 189–195.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuznetsov, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 06 февраля 2020 г.
Received: February 6, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-239-251

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF DECISIONS MAKING BY THE NAVIGATOR

S. G. Fadyushin

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

The content of the paper belongs to the field of interdisciplinary scientific research, which lies at the intersection of cognitive psychology and navigation, and is devoted to the topic of decision-makings by a navigator that is relevant for navigation. The results of the author's theoretical research on the formalization of some aspects of human mental activity and their representation in practical implementation for solving problems of navigation are reflected in the paper. The human factor is a complex multidimensional problem that covers the entire spectrum of human activities at sea. Only a small part of this problem is described in the paper, which is of a debatable theoretical nature. The specificity of the study is that the navigator is, first of all, a person who makes not just decisions, but decisions with sense. Therefore, the navigator inclusion into the ship control link leads to the need to simultaneously take into account the navigator psychological characteristics, his ability to make meaningful decisions, and the characteristics of the ship controllability as an object of control. At the same time, the decisions made by the navigator are subjective and difficult to formalize. The purpose of the study is to formalize, i.e., to describe mathematically the quantitative assessment of decision making by the navigator.

To calculate the amount of meaning in the decisions made by the navigator, the method of probabilistic evaluation of the sense in a text message is used. A model in the form of a semantic prism is proposed as a structure of the semantic space where the navigator makes decisions. The results obtained on a practical example are adapted to the concepts of navigation and therefore may be of interest to specialists in ship traffic control automation, artificial intelligence, creation of intelligent control systems and navigation safety.

Keywords: navigation, human factor of navigation, safety of navigation, ship control, entropy.

For citation:

Fadyushin, Sergey G. "Mathematical description of the quantitative assessment of decisions making by the navigator." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 239–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-239-251.

УДК 656.61.052

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СУДОВОДИТЕЛЕМ

С. Г. Фадюшин

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

Статья относится к междисциплинарным научным исследованиям, лежащим на стыке когнитивной психологии и судовождения, и посвящена актуальной для мореплавания теме принятия решений судоводителем. В ней отражены результаты теоретических исследований по формализации некоторых аспектов мыслительной деятельности человека и представлена их практическая реализация для решения задач судовождения. Рассмотрена сложная многомерная проблема, охватывающая весь спектр человеческой деятельности на море. В данной работе, которая носит дискуссионно-теоретический характер, освещена лишь небольшая часть этой проблемы. Специфика исследования состоит в том, что судоводитель — это прежде всего человек, принимающий решения, наделенные смыслом. Поэтому включение судоводителя в звено управления судном приводит к необходимости одновременного учета его психологических характеристик и характеристик управляемости судна как объекта управления. При этом принимаемые судоводителем решения носят субъективный характер и трудно поддаются формализации.

Цель исследования заключается в формализации, т. е. в математическом описании количественной оценки принятия решений судоводителем. Для этого используется авторская методика вероятностной оценки смысла в текстовом сообщении. В качестве структуры смыслового пространства, в координатах которого судоводитель принимает решения, предлагается модель в виде смысловой призмы. Полученные

результаты на практическом примере адаптированы к понятиям судовождения и поэтому могут представлять интерес для специалистов по автоматизации управления движением судна, искусственному интеллекту, созданию интеллектуальных систем управления и безопасности мореплавания.

Ключевые слова: судовождение, человеческий фактор судовождения, безопасность судовождения, управление судном, энтропия.

Для цитирования:

Фадюшин С. Г. Математическое описание количественной оценки принятия решений судоводителем / С. Г. Фадюшин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С.239–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-239-251.

Введение (Introduction)

Ряд серьезных морских аварий и катастроф, которые произошли в конце XX в., заставил международное морское сообщество переосмыслить систему безопасности мореплавания и по-новому взглянуть на проблему, связанную с принятием решений судоводителем при управлении движением судна. Так, в 1997 г. Международная морская организация (ИМО) приняла Резолюцию «А.850(20). Концепция человеческого элемента, принципы и цели организации (ИМО)», в которой отмечается, что человеческий элемент — это комплексный, многогранный вопрос, затрагивающий безопасность на море и защиту морской окружающей среды.

Резолюция ИМО явилась мощным стимулом к проведению научных исследований в области человеческого фактора. Изучаются способности судоводителя действовать в экстремальных навигационных ситуациях и сложных условиях плавания [1]. Исследуется роль человеческого фактора как психологической составляющей в обеспечении безопасности и профессиональной надежности судоводителя в экстремальных, сложных условиях чрезвычайной ситуации. В работе [2] представлен обзор действия человеческого фактора в области таких характеристик и особенностей поведения и деятельности, как усталость, стресс, здоровье, осведомленность о ситуации, совместная работа, принятие решений, связь, автоматизация и культура безопасности. Человеческий элемент (фактор) учитывается при проведении исследований в рамках проекта e-Navigation ИМО [3]. Однако несмотря на достигнутый прогресс, следует отметить, что проблема человеческого фактора в судовождении пока еще далека от своего окончательного решения. По среднестатистическим данным, на долю этого фактора приходится в среднем 70–80 % аварий¹ [4]–[6]. На водном транспорте эта цифра, по данным некоторых источников, достигает 90 %².

При проведении исследований по проблеме человеческого фактора часто не принимается во внимание тот факт, что «система управления подвижным объектом (кораблем, судном, самолетом) является человеко-машинной и состоит из регулятора, в состав которого входят также оператор (вахтенный судоводитель, пилот) и объект регулирования, которым является подвижной объект как инженерное сооружение» [7]. Включение судоводителя в звено управления судном в качестве элемента технического регулятора вносит ряд существенных проблем, так как при этом необходимо одновременно учитывать и психологические характеристики судоводителя, и характеристики управляемости судна. В случае, если характеристики управляемости в основном формализованы и учитываются техническим регулятором, то решения по управлению движением судна, которые принимает судоводитель, носят субъективный характер и, следовательно, трудно поддаются формализации. Одним из путей решения этой проблемы может быть нормирование (количественная оценка) человеческого фактора «... большой интерес может представить попытка нормирования человеческого фактора, т. е. количественная оценка степени нашей уверенности в том, что его влияние на безопасность судна будет сведено к минимуму» [7, с. 6]. В этом науч-

¹ Информационный бюллетень «INTERTANKO». Tanker incidents. 2008. 27 с.

² Количество аварий на водном транспорте в 2015 году увеличилось на 62%, большая часть приходится на рыбопромысловые суда. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://portnews.ru/top_news/216552/ (дата обращения: 28.08.2018). Human Element International Maritime Organization. Web. 28 Aug. 2018 <<http://www.imo.org/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx>>.

ном направлении уже проводятся исследования. Например, в работе [8] дано обоснование метода количественной оценки влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна. Этот метод положен в основу превентивного регулирования человеческого фактора в процессе судовождения. По сути, предлагается новая методология, которая позволяет отказаться от бинарного подхода к оценке качества систем управления безопасностью и перейти к количественной оценке.

Цель данного исследования заключается в математическом описании (формализации) количественной оценки принятия решений судоводителем. Специфика исследования состоит в том, что судоводитель — это прежде всего человек, имеющий определенные личностные характеристики, которые описываются категориями психологии. Поэтому первый этап исследования выполнен в контексте понятий психологии, а затем полученные результаты адаптированы для судовождения. Человеческий элемент представляет собой сложную многомерную проблему, которая охватывает весь спектр человеческой деятельности на море. В данной работе описывается лишь небольшая часть этой сложной проблемы. С результатами исследований по теме человеческого фактора также можно ознакомиться в работах [9]–[12].

Основу данного исследования составляет работа [9], в которой описана методика вероятностной оценки количества смысла в текстовом сообщении, согласно которой для количественной оценки смысла рассчитывается разность энтропий ΔH смежных слов по всему тексту. Гистограмма разности энтропий показывает, что ΔH как случайная величина имеет экспоненциальный закон распределения, параметрами которого можно оценить величину смысла. Для оценки предлагается использовать такой параметр, как дифференциальная энтропия $H(\Delta H)$. Чем больше величина дифференциальной энтропии экспоненциального распределения случайной величины ΔH , тем больше смысла и наоборот. Данная закономерность дает возможность использовать дифференциальную энтропию для количественной оценки смысла целенаправленной осознанной деятельности человека в качестве психометрического критерия M : $M = H(\Delta H)$.

При оценке смысла сравниваются и анализируются значения критериев оценки смысла исходного M_s и вероятностного M_p текстов¹:

- если $M_s > M_p$, то, вероятнее всего, исходный текст содержит смысл;
- если $M_s \leq M_p$, то, вероятнее всего, исходный текст не содержит смысла.

В принятых терминологических понятиях психологии гипотеза исследования заключается в том, что за основной элемент смыслового пространства² принята интенция, базисом которой служат такие структурообразующие элементы как знак, денотат (значение) и смысл. С точки зрения судовождения, «интенция» — это план (замысел) судоводителя, направленный на решение задачи по управлению движением судна и показывающий субъективную цель судоводителя при ее решении.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В основе математического описания лежат такие понятия из области психологии, как знак, денотат, смысл, интенция, которые образуют структуру смыслового пространства. В качестве объекта исследования используется текст как отражение (формализованный образ) целенаправленной деятельности человека, в том числе мыслительной, связанной с принятием решений судоводителем. Пример использования текста для исследования структурных элементов смысловой реальности: «Мы понимаем не текст, а мир, стоящий за текстом...» [14, с. 4].

Значение понятий *знак*, *денотат* и *смысл* описывается в классическом труде по феномену смысла Г. Фреге «Смысл и денотат». В этой работе ученым было исследовано связанное словосочетание «значение-смысл». В частности, денотат (значение) знака (слово, словосочетание) — это определенная вещь в самом широком смысле слова, которую обозначает и суждение, о которой

¹ Вероятностный текст — исходный текст, в котором слова переставлены случайным образом.

² В психологии смысла для обозначения структуры и динамики смысловых феноменов и процессов принят термин «смысловая реальность» [13]. В данной работе используется тождественное, но менее широкое понятие «смысловое пространство» как один из элементов смысловой реальности.

сигнализирует знак; смысл — это способ представления денотата, связующий знаки в единое целое (осмысленный текст) [15]. Введенные Г. Фреге понятия вошли в основу образного представления семантической (смысловой) реальности в виде плоской фигуры — семантического треугольника, вершинами которого являются: знак, денотат и смысл.

Приняв за основу понятия, введенные Г. Фреге, в данной работе смысловое пространство представлено как совокупность следующих структурных элементов: знак, денотат, смысл, интенция. Значение этих элементов поясним на следующем примере. Предположим, если человек берет орудие лова (знак — «орудие лова»), то это означает, что он собирается ловить рыбу (денотат — «лов рыбы»), чтобы добыть пищу (интенция — «добывание пищи»). В этом действии смысл прослеживается через отношение цели (интенции) «добывание пищи» к потребности «обеспечение питанием» и заключается в суждении «человек идет на рыбалку добывать рыбу, чтобы обеспечить себя питанием». Но собираясь на рыбную ловлю, другой человек может преследовать другую цель (например, отдых на лоне природы). При этом знак и денотат останутся теми же: «орудие лова» и «лов рыбы», а смысл будет заключаться в суждении «человек идет на рыбалку, чтобы отдохнуть на лоне природы». В этом случае интенцию можно описать выражением «отдых на лоне природы».

Методика, использованная при исследовании структуры смысловой реальности, основана на следующих посылах:

– «...под знаком (или именем) я понимаю любое обозначение, выступающее в роли имени собственного» [15, с. 354];

– «Денотатом [Bedeutung] предложения является его истинностное значение [Wahrheitswert], а смыслом [Sinn] — некоторое суждение [Gedanke]» [15, с. 378];

– «Смысл и денотат знака следует отличать от соответствующего этому знаку представления. Если денотат знака — это вещь, данная нам в ощущениях, то мое представление об этой вещи есть внутренний образ, возникший у меня на основе моих впечатлений от этой вещи, а также в результате моей деятельности, физической и мыслительной, связанной с этой вещью» [15, с. 356];

– «представление» по Г. Фреге в контексте данной работы это и есть интенция.

Для анализа и оценки каждого из структурных элементов смыслового пространства проведен эксперимент, заключающийся в воспроизведении исходного эталонного текста из набора случайным образом распределенных слов этого же исходного текста. За основу взят текст [16, с. 117–118], который был приведен к вероятностному виду путем случайной перестановки в нем слов по предложениям. В результате получился набор ключевых слов. Затем участникам эксперимента по этому набору предлагалось воспроизвести исходный текст в собственной интерпретации, т. е. допускалось добавлять свои слова и использовать в предложениях произвольный порядок слов. В заключение участникам предлагалось ответить на вопрос: «О чем этот текст?». В эксперименте участвовали студенты 1-го курса МГУ им. адм. Г. И. Невельского и 4-го курса ДВФУ. Всего было проанализировано 50 воспроизведенных текстов. Количество знаков определялось путем подсчета количества слов в исходном и восстановленном текстах.

Денотат оценивался как количество информации в тексте, рассчитанной по формуле К. Шеннона:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i,$$

где H — энтропия множества вероятностей p_i ; p_i — вероятность появления какой-либо буквы в тексте.

Способность участника эксперимента понять и воспроизвести смысл исходного текста оценивалась путем расчета количества смысла в восстановленном тексте и сравнения его с количеством смысла в исходном. Для расчета использовалась методика, описанная в статье [9]. При сравнении исходного текста с восстановленным по величине смысла для обоих типов текста (исходного и восстановленного) рассчитывалась величина ΔMs : $\Delta Ms = Ms / Mp$. Было установлено следующее: чем больше значение ΔMs , тем больше смысла в тексте и наоборот. Результаты, полученные после расчетов, представлены в следующей таблице.

Оценка структурных элементов смыслового пространства в исходном и восстановленном тексте

Структурный элемент смыслового пространства	Исходный текст	Восстановленный текст
Знак	1,00	0,81
Денотат	4,48	4,47
Смысл	1,57	1,65

Примечание. Табличные данные показывают количество бит, приходящееся на один символ текста. При этом условно принято, что для исходного текста один символ соответствует одному биту. Для восстановленного текста количество бит рассчитано по отношению к исходному тексту. Интенция оценивалась по ответам на вопрос: «О чем этот текст?»

Приведенные в таблице данные показывают, что для восстановления исходного текста участники эксперимента использовали меньшее количество слов (в среднем 246 слов) и уровень информативности полученных текстов (в среднем 4,47 бит на символ) оказался меньше, чем в исходном тексте (4,48 бит на символ). Очевидно, это связано с тем, что уровень эрудированности автора исходного текста выше, чем у респондентов. Однако по уровню осмысленности тексты участников эксперимента не уменьшились, а, наоборот, увеличились по сравнению с уровнем осмысленности исходного текста (показатель осмысленности ΔMs для исходного текста — 1,57, для восстановленного — 1,65). На основании ранее изложенного был сделан вывод о том, что человек по случайному набору слов исходного текста в состоянии воспроизвести смысл исходного текста и более того, творчески подходя к этому процессу, способен вложить в реконструированный текст свою «долю» смысла.

Полученные результаты показывают, что участники эксперимента использовали достаточное количество ключевых слов и смогли правильно оценить денотат исходного текста. Однако, судя по ответам на поставленный вопрос: «О чем этот текст?», интенция (представление о какой-либо вещи, ее внутренний образ в сознании человека) меняется от человека к человеку, так как ответы на этот вопрос у всех респондентов оказались разными. Интенция — это продукт мыслительной деятельности каждого отдельно взятого человека. Поэтому логично предположить, что добавочная «доля» смысла обязана своим появлением именно интенции. Тем самым подтверждается гипотеза исследования. Полученные результаты легли в основу математического описания человеческого фактора.

Результаты (Results)

В абстрактных математических понятиях семантический треугольник Г. Фреге представляет собой структуру смыслового пространства на плоскости, структурообразующими элементами которого являются знак, денотат и смысл. Если к этим элементам добавить интенцию, то для формального изображения структуры смыслового пространства можно использовать прямоугольную систему координат в пространстве. В этой системе знак, денотат и смысл — единичные координатные векторы (орты), образующие базис, интенция — вектор смыслового пространства. При разложении вектора интенции по базису структуру смыслового пространства можно представить в виде прямоугольного параллелепипеда (смысловой призмы) — рис. 1, где оси пространственной системы координат имеют следующие обозначения: ось X — знак, Y — денотат, Z — смысл. Знак, денотат и смысл представлены в безразмерном виде с сохранением пропорций по данным таблицы.

В пространственной системе координат интенцию можно представить в виде вектора $\vec{G}$, разложенного по единичным векторам $\vec{a}, \vec{b}, \vec{s}$, представляющим соответственно знак, денотат и смысл:

$$\vec{G} = g_x \vec{a} + g_y \vec{b} + g_z \vec{s},$$

где g_x, g_y, g_z — коэффициенты (координаты) интенции по соответствующим осям, показывающие сколько в среднем бит приходится на один знак.

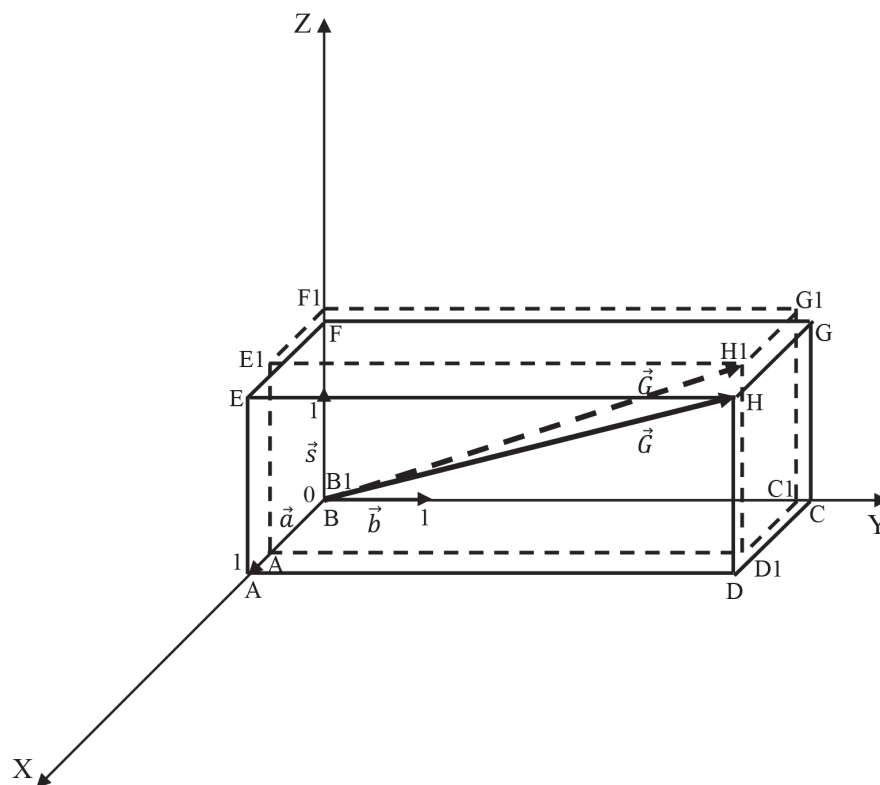


Рис. 1. Структура смыслового пространства

Условные обозначения:

$\vec{a}, \vec{b}, \vec{s}$ — единичные векторы (орты), соответственно, знака, денотата и смысла;
 $\vec{G}$ — вектор интенции; $ABCDEFGH$ — прямоугольный параллелепипед (смысловая призма) исходного текста; $A_1B_1C_1D_1E_1F_1G_1H_1$ — прямоугольный параллелепипед (смысловая призма) восстановленных текстов

По данным таблицы, вектор интенции для исходного текста будет иметь вид

$$\vec{G} = g_x \vec{a} + 4,5 \vec{b} + 1,6 \vec{s},$$

где коэффициент g_x условно принят равным единице и зависит от вида кодировки алфавита, например, для русскоязычного текста в кодировке KOI8-R коэффициент g_x будет равен восьми, так как в этой кодировке на один символ приходится 8 бит.

Для восстановленных текстов

$$\vec{G} = 0,8 \vec{a} + 4,4 \vec{b} + 1,7 \vec{s}.$$

От теоретических выкладок, полученных при анализе текста как объекта исследования, перейдем непосредственно к человеческому фактору судовождения. Если считать текст как отражение мыслительной деятельности человека, то в интерпретации понятий судовождения знак, денотат и смысл имеют следующие значения:

- «знак» — точка принятия решения судоводителем (промежуточная точка траектории движения);
- «денотат» — энтропия системы «судоводитель — судно — объект маневра»;
- «смысл» — статистический параметр, показывающий эффективность принимаемых решений;
- «интенция» — замысел судоводителя, т. е. план действий.

Для перехода от понятий психологии к понятиям судовождения рассмотрим следующий пример. Судну, ведущему лов в районе промысла, необходимо сблизиться с подвижным косяком рыб. Сближение осуществляется по траектории, координаты и параметры которой предваритель-

но рассчитаны по известным в промысловом судоководении методам, с которыми можно ознакомиться в работах [17], [18], обобщением которых является *метод пропорциональной навигации*, изложенный в работе [19]. Цель этого метода — связать угловую скорость поворота линии пеленга с угловой скоростью поворота вектора скорости судна через коэффициент пропорциональности, который называется *навигационной постоянной*. При реализации данного метода необходимо постоянно измерять угловую скорость поворота линии пеленга на объект маневра и сравнивать ее с угловой скоростью поворота вектора скорости судна.

Предположим, что при сближении судна с косяком рыб угол дрейфа равен нулю, т. е. вектор скорости судна направлен вдоль диаметральной плоскости. Тогда уравнение метода пропорциональной навигации будет иметь следующий вид:

$$\dot{K}_c = b\dot{P}, \quad (1)$$

где $\dot{K}_c$ — скорость изменения курса судна; $\dot{P}$ — скорость изменения пеленга на объект маневра; b — коэффициент пропорциональности (навигационная постоянная).

Судоводитель как регулятор управления не в состоянии реализовать уравнение (1). Для этого ему бы понадобилось в каждый момент времени измерять угловую скорость линии пеленга на объект маневра и сравнивать ее с угловой скоростью поворота вектора скорости судна, что практически для человека не осуществимо. Поэтому при наведении судна на подвижный объект (косяк рыб) при заданном векторе его движения по дистанции D и пеленгу рассчитываются координаты промежуточных точек траектории движения относительно точек местоположения объекта маневра $K_0, K_1, \dots, K_n$. При таком способе сближение осуществляется по промежуточным точкам $C_0, C_1, \dots, C_m$ на прямых курсах до точки встречи TB (рис. 2).

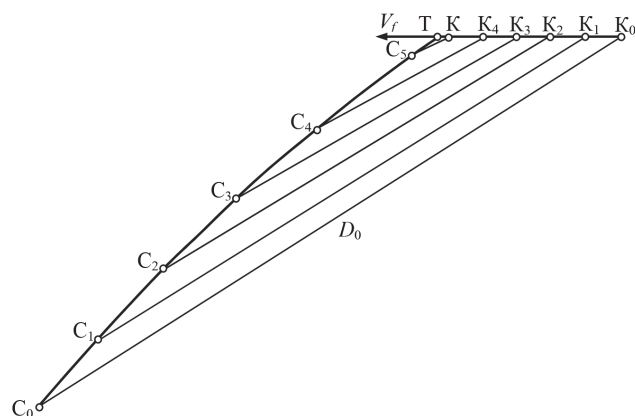


Рис. 2. Кинематическая траектория судна при сближении с объектом маневра методом пропорциональной навигации

Промежуточные точки имеют двойственное значение: с одной стороны, это детерминированные точки кинематической траектории движения, с другой — точки, в которых судоводитель принимает решения по управлению движением судна, т. е. это точки, частота которых зависит от множества случайных причин, включая человеческий фактор.

Случайное распределение точек в поле траектории удовлетворяет следующим условиям:

1. Точки распределяются статистически равномерно.
2. Точки распределяются независимо друг от друга.
3. Вероятность попадания на малый участок двух или более точек пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одной точки.

В теории вероятностей заданным условиям соответствует закон распределения случайной величины, называемый *законом Пуассона*.

По закону Пуассона вероятность того, что величина X (количество точек) примет определенное значение m , выражается формулой

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a} (m = 0, 1, \dots), \quad (2)$$

где a — некоторая положительная величина, называемая параметром закона Пуассона, представляющая собой среднее число точек, приходящееся на отрезок l траектории движения.

Тогда для расчета энтропии, которая необходима для нахождения денотата и смысла, можно воспользоваться известной формулой К. Шеннона:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^m p_m \log_2 p_m, \quad (3)$$

где p_m — вероятность того, что количество точек примет значение m .

Учитывая, что промежуточные точки траектории движения также являются точками принятия решений, p_m можно трактовать как вероятность возможных состояний системы: «судоводитель — судно — объект маневра» в m -й точке траектории движения.

В математическом виде «интенцию» как план действий судоводителя можно представить в виде вектора $\vec{G}$, разложенного по единичным векторам $\vec{a}, \vec{b}, \vec{s}$:

$$\vec{G} = g_x \vec{a} + g_y \vec{b} + g_z \vec{s}, \quad (4)$$

где $\vec{a}, \vec{b}, \vec{s}$ — коэффициенты (координаты) «интенции» по соответствующим осям, показывающие сколько в среднем бит приходится на одну промежуточную точку траектории движения.

Расстояние между концами вектора «интенции» эталонной ситуации $\vec{G}_0$ и вектора «интенции» текущей ситуации $\vec{G}_j$ определяет расстояние оценки текущей ситуации относительно оценки эталонной ситуации и выражается вектором $\vec{\gamma}_t$. Чем меньше модуль $\vec{\gamma}_t$, тем ситуация ближе к эталонной. При заданном значении модуля эталонной ситуации $|\vec{\gamma}_{t0}|$ и сравнении с ним модуля $|\vec{\gamma}_t|$.

$$|\vec{\gamma}_t| \leq |\vec{\gamma}_{t0}| \quad (5)$$

происходит распознавание ситуации как соответствующей заданной эталонной. Это дает возможность судоводителю принимать соответствующие обоснованные решения по управлению судном.

Пример. В качестве примера рассмотрим абстрактную¹ ситуацию сближения судна с объектом маневра. Траекторию движения судна разделим на три участка разной длины (рис. 3).

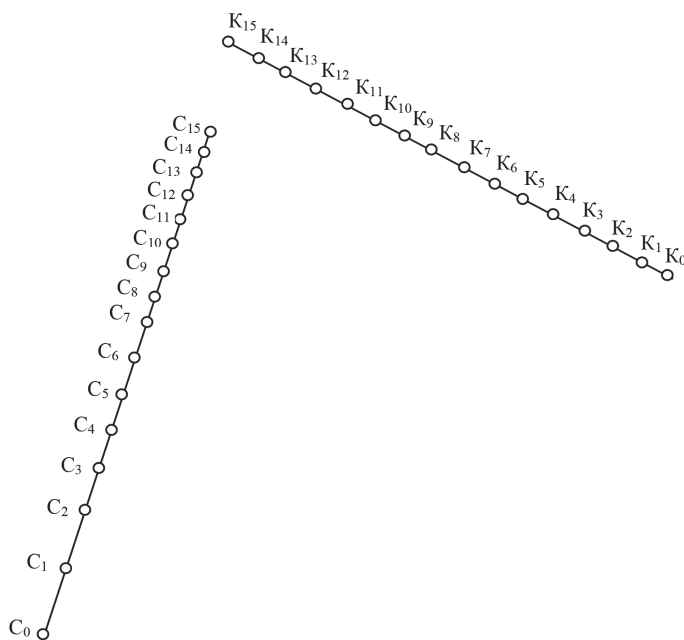


Рис. 3. Ситуация сближения судна с объектом маневра:
С — судно; К — объект маневра

¹ Приведенный пример служит наглядным подтверждением полученных результатов и не описывает конкретную ситуацию, которой, например, может быть сближение двух судов.

Первый участок — точки C_0-C_2 , второй — C_3-C_7 , третий — C_8-C_{15} . Неравномерный характер распределения точек по траектории движения, плотность которых возрастает с уменьшением расстояния до объекта маневра, является косвенным доказательством того, что в этих точках судоводителем принимались решения.

Решение

1. По формуле (3) рассчитаем энтропию («денотат») системы «судоводитель – судно – объект маневра» для каждого из участков траектории движения. Для этого по формуле (2) определяем вероятности соответствующих точек:

– первый участок:

$$P_3 = \frac{a^3}{3!} e^{-a} = 0,223618;$$

– второй участок:

$$P_5 = \frac{a^5}{5!} e^{-a} = 0,152814;$$

– третий участок:

$$P_8 = \frac{a^8}{8!} e^{-a} = 0,011867.$$

Находим энтропию («денотат»):

$$H(X) = -\sum_{i=1}^m p_m \log_2 p_m = -0,97328 \text{ бит / символ.}$$

2. Определяем эффективность принимаемых судоводителем решений («смысл»). Для этого рассчитываем значения энтропий для каждого участка траектории.

Энтропия первого участка:

$$H(X)_1 = -\sum_{i=0}^2 p_3 \log_2 p_3 = -0,48321 \text{ бит / символ.}$$

Энтропия второго участка:

$$H(X)_2 = -\sum_{i=3}^7 p_5 \log_2 p_5 = -0,41415 \text{ бит / символ.}$$

Энтропия третьего участка:

$$H(X)_3 = -\sum_{i=8}^{15} p_8 \log_2 p_8 = -0,07591 \text{ бит / символ.}$$

Находим разности энтропий:

$$\Delta H_1 = |\Delta H(X)_1| - |\Delta H(X)_2| = 0,06906 \text{ бит / символ;}$$

$$\Delta H_2 = |\Delta H(X)_2| - |\Delta H(X)_3| = 0,33824 \text{ бит / символ.}$$

Находим дифференциальную энтропию экспоненциального распределения разности энтропий текущей ситуации:

$$M_s = H(\Delta H) = -0,591353 \text{ бит / символ.}$$

Находим дифференциальную энтропию экспоненциального распределения разности энтропий вероятностной ситуации, для которой вероятности распределим в следующем случайном порядке: P_8, P_2, P_3 ¹. Выполним расчеты для нового порядка распределения вероятностей по тем же

¹ По аналогии с текстом вероятностная ситуация будет соответствовать тексту, в котором слова исходного текста представлены в случайном порядке. В таком тексте и, соответственно, вероятностной ситуации по умолчанию количество смысла будет равно нулю. Поэтому величина смысла в них может быть принята в качестве своеобразного нуля отсчета количества смысла для исходного текста и, соответственно, текущей ситуации.

формулам, что и для текущей ситуации, получим дифференциальную энтропию экспоненциального распределения разности энтропий вероятностной ситуации:

$$M_p = H(\Delta H) = -0,591352 \text{ бит / символ.}$$

Для текущей и вероятностной ситуаций рассчитывается величина ΔM_s : $\Delta M_s = M_s / M_p$. Чем больше значение ΔM_s , тем больше «смысла» в действиях судоводителя и наоборот¹.

$$\Delta M_s = \frac{M_s}{M_p} = \frac{-0,591353}{-0,591352} = 1,0000017.$$

3. С учетом полученных результатов, вектор «интенции» для текущей ситуации будет иметь вид:

$$\vec{G}_j = \vec{a} + 0,9732800\vec{b} + 1,0000017\vec{s},$$

где коэффициент g_x условно принят равным единице².

Вектор «интенции» эталонной ситуации находится по тем же формулам, что и для текущей. В качестве примера эталонной ситуации может служить ситуация, изображенная на рис. 2. Для примера предположим, что

$$\vec{G}_0 = \vec{a} + 0,9832800\vec{b} + 1,0000007\vec{s}.$$

4. По известной в аналитической геометрии формуле рассчитаем расстояние между концом вектора «интенции» эталонной ситуации $\vec{G}_0$ и концом вектора «интенции» текущей ситуации $\vec{G}_j$:

$$|\vec{\gamma}_t| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = 0,01.$$

6. Полученное значение модуля $|\vec{\gamma}_t|$ сравниваем с заданным значением модуля $|\vec{\gamma}_{t0}|$, которое рассчитывается с учетом существующих норм судовождения и хорошей морской практики. Предположим $|\vec{\gamma}_{t0}| = 0,02$. В этом случае условие (5) запишется в виде:

$$0,01 \leq 0,02.$$

Так как условие выполняется, можно сделать вывод о том, что текущая ситуация соответствует заданной эталонной, т. е. судоводитель в этой ситуации принимает правильные решения.

Выводы (Conclusions)

Основные результаты проведенного исследования состоят в следующем:

- описана структура смыслового пространства в пространственной системе координат в виде абстрактного математического объекта — смысловой призмы;
- определены структурные элементы смыслового пространства: знак, денотат, смысл, интенция.

Статистический анализ текстов, восстановленных по ключевым словам исходного текста, подтвердил основной тезис гипотезы исследования, что интенция — это главный структурный элемент. Знак, денотат и смысл — структурообразующие элементы, составляющие фундамент смыслового пространства.

В интерпретации понятий судовождения интенция, знак, денотат и смысл имеют следующие значения:

- «интенция» — замысел судоводителя, т. е. план действий;
- «знак» — точка принятия решения судоводителем (промежуточная точка траектории движения);
- «денотат» — энтропия системы «судоводитель – судно – объект маневра»;

¹ В примере рассматривается гипотетическая ситуация, поэтому полученные результаты могут отличаться от результатов реальной ситуации и иметь малые величины.

² Для текста коэффициент g_x зависит от вида кодировки алфавита.

— «смысл» — статистический параметр, показывающий эффективность принимаемых судоводителем решений.

Переход от понятий психологии к понятиям судовождения позволил на практическом примере адаптировать математическое описание структуры смыслового пространства в психологическом аспекте к математическому описанию количественной оценки принятия решений судоводителем.

Полученные результаты могут представлять интерес для специалистов по автоматизации управления движением судна, искусственному интеллекту, созданию интеллектуальных систем управления и безопасности мореплавания.

Человеческий элемент представляет собой сложную многомерную проблему, которая охватывает весь спектр человеческой деятельности на море. Нормирование (количественная оценка) принятия решений судоводителем также является сложной исследовательской задачей. В данной работе описывается лишь небольшая часть этой сложной, многогранной и многомерной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akten N. Analysis of shipping casualties in the Bosphorus / N. Akten // The Journal of Navigation. — 2004. — Vol. 57. — Is. 3. — Pp. 345–356. DOI: 10.1017/S0373463304002826.
2. Hetherington C. Safety in shipping: The human element / C. Hetherington, R. Flin, K. Mearns // Journal of safety research. — 2006. — Vol. 37. — Is. 4. — Pp. 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
3. Patraiko D. e-Navigation and the Human Element / D. Patraiko, P. Wake, A. Weintrit // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2010. — Vol. 4. — № 1. — Pp. 11–16.
4. Пазовский В. М. Аварийность на мировом флоте / В. М. Пазовский // Безопасность судоходства в Дальневосточном бассейне: сб. докл. науч.-практ. конф. 24–25 октября 2007 г. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2007. — С. 108–113.
5. Субанов Э. Э. Адаптация метода анализа иерархий для принятия решений при оценке степени опасности столкновения морских судов / Э. Э. Субанов, А. В. Миронов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2012. — № 3 (167). — С. 8–12.
6. Tzannatos E. Human element and accidents in Greek shipping / E. Tzannatos // The Journal of Navigation. — 2010. — Vol. 63. — Is. 1. — Pp. 119–127. DOI: 10.1017/S0373463309990312.
7. Сазонов А. Е. Человеческий фактор и безопасность управления подвижными объектами / А. Е. Сазонов // Сб. материалов XVI Общего собрания академии навигации и управления движением. — 2003. — С. 6–8.
8. Ермаков С. В. Превентивное регулирование человеческого фактора в морском судовождении / С. В. Ермаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5(39). — С. 39–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
9. Фадюшин С. Г. Вероятностная оценка смысла / С. Г. Фадюшин // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. — 2018. — № 1. — С. 37–54. DOI: 10.11621/vsp.2018.01.37.
10. Фадюшин С. Г. Человеческий фактор судовождения в аспекте кибернетического подхода / С. Г. Фадюшин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 922–935. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-922-935.
11. Fadyushin S. G. Entropy As an Assessment Factor of the Current State of Vessel When Approaching an Object of Maneuver / S. G. Fadyushin, E. A. Vereshchagina, A. K. Rudnichenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 272. — Is. 2. — Pp. 022120. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022120.
12. Fadyushin S. G. The Linear Assessment Model for Navigational Factors / S. G. Fadyushin // World Applied Sciences Journal. — 2014. — Vol. 29. — Is. 5. — Pp. 689–693. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.29.05.13904.
13. Леонтьев Д. А. Психология смысла: природа, строение и динамика смысловой реальности / Д. А. Леонтьев. — 3-е изд., доп. — М.: Смысл, 2007. — 512 с.
14. Леонтьев А. А. Предисловие / А. А. Леонтьев // Материалы Всесоюзной научно-практической конференции «Психолого-педагогические проблемы обучения технике чтения, смысловому восприятию и пониманию текста» 12–15 мая 1988 г. / Под ред. И. В. Усачевой. — М., 1989. — С. 3–10.
15. Фреге Г. Избранные работы / Г. Фреге. — М.: Дом интеллектуальной книги, 1997. — 160 с.

16. Фадюшин С. Г. «Радость — пламя неземное» или дискуссия о значении защитных механизмов в подростковом возрасте / С. Г. Фадюшин // Альманах современной науки и образования. — 2009. — № 10-2. — С. 115–118.
17. Фадюшин С. Г. Сближение судна с подвижным объектом методом пропорциональной навигации / С. Г. Фадюшин // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 4. — С. 121.
18. Фадюшин С. Г. Методы наведения судна на движущийся косяк рыбы / С. Г. Фадюшин // Вестник Морского государственного университета. — 2012. — № 25. — С. 90–95.
19. Канн В. Л. Теория пропорциональной навигации / В. Л. Канн, А. С. Кельзон. — Л.: Судостроение, 1965. — 423 с.

REFERENCES

1. Akten, Necmettin. "Analysis of Shipping Casualties in the Bosphorus." *Journal of Navigation* 57.3 (2004): 345–356. DOI: 10.1017/S0373463304002826.
2. Hetherington, Catherine, Rhona Flin, and Kathryn Mearns. "Safety in shipping: The human element." *Journal of safety research* 37.4 (2006): 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
3. Patraiko, D., P. Wake, and A. Weintrit. "e-Navigation and the Human Element." *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 4.1 (2010): 11–16.
4. Pazovskiy, V. M. "Аварийность на мировом флоте." *Bezopasnost' sudokhodstva v Dal'nevostochnom basseyne: Sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 24-25 oktyabrya 2007. Vladivostok: Maritime State University Press, 2007: 108–113.
5. Subanov, E. E., and A. V. Mironov. "Hierarchy analysis adoption in taking decisions while evaluation of danger degree in sea vessels collision." *University news. North-Caucasian region. Technical sciences series* 3(167) (2012): 8–12.
6. Tzannatos, Ernestos. "Human Element and Accidents in Greek Shipping." *Journal of Navigation* 63.1 (2010): 119–127. DOI: 10.1017/S0373463309990312.
7. Sazonov, A. Ye. "Chelovecheskiy faktor i bezopasnost' upravleniya podvizhnymi ob'yektami." *Sbornik materialov XVI Obshchego sobraniya akademii navigatsii i upravleniya dvizheniyem*. 2003. 6–8.
8. Ermakov, Sergey Vladimirovich. "Preventive regulation of the human factor in marine navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 39–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
9. Fadyushin, Sergey G. "Probabilistic evaluation of sense." *Moscow University Psychology Bulletin* 1 (2018): 37–54.
10. Fadyushin, Sergey G. "Human factor of navigation in the aspect of cybernetic approach." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 922–935. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-922-935.
11. Fadyushin, S. G., E. A. Vereshchagina, and A. K. Rudnichenko. "Entropy As an Assessment Factor of the Current State of Vessel When Approaching an Object of Maneuver." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 272. No. 2. IOP Publishing, 2019. 022120. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022120.
12. Fadyushin, S. G. "The Linear Assessment Model for Navigational Factors." *World Applied Sciences Journal* 29.5 (2014): 689–693. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.29.05.13904.
13. Leontiev, D. A. *Psikhologiya smysla: priroda, stroenie i dinamika smyslovoy real'nosti*. 3rd ed. M.: Smysl, 2007.
14. Leont'yev, A. A. "Predisloviye." *Materialy Vsesoyuznoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Psikhologo-pedagogicheskiye problemy obucheniya tekhnike chteniya, smyslovomu vospriyatiyu i ponimaniyu teksta* 12—15 maya 1988 g. Edited by I.V. Usacheva. M., 1989. 3–10.
15. Frege, G. *Izbrannyye raboty*. M.: Dom intellektual'noy knigi, 1997.
16. Fadyushin, S. G. "«Radost' — plama nezemnoe» ili diskussiya o znachenii zashchitnykh mekhanizmov v podrostkovom vozraste." *Al'manakh sovremennoi nauki i obrazovaniya* 10-2 (2009): 115–118.
17. Fadyushin, S. G. "Proportional navigation and its use at control of vessel as an approach method to mobile object." *Modern problems of science and education* 4 (2012): 121.
18. Fadyushin, S. G. "Metody navedeniya sudna na dvizhushchiysya kosyak ryby." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 25 (2012): 90–95.
19. Kann, V. L., and A. S. Kel'zon. *Teoriya Proportsional'noy Navigatsii*. L.: Sudostroyeniye, 1965.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадюшин Сергей Геннадьевич —
кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет
690091, Российская Федерация, г. Владивосток,
Суханова, 8
e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fadyushin, Sergey G. —
PhD, associate professor
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690090,
Russian Federation
e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

*Статья поступила в редакцию 9 января 2020 г.
Received: January 9, 2020.*

PROCESSES FOR FORMING GROUPAGE CONTAINER CONSIGNMENTS

O. A. Izotov, Y. I. Vasiliev, O. A. Razhev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The analysis of the formation, development and implementation of forwarding activities by regional centers of consolidation (distribution) of groupage consignments of container cargo as the main elements of the modern container transport system, the essence of which is reduced to the connection of space and time with timely and safe delivery of goods with minimal costs, is performed.

The methods of delivering groupage cargo to container terminals from the country rear zones in conditions of the transport process continuity, which requires taking into account the environmental behavior and the market of transport services, are disclosed. The existing strategic solutions aimed at forming a managed transportation system are considered and the new ones are proposed.

The ways of reducing the total number of transshipments of small consignments on the way of introduction into the transport container system, are revealed. The forwarding services role for cargo shipments in the low-tonnage containers is revealed.

Approaches to the problem of forming new standard cargo units that perfectly fit into existing container-technological systems are considered. Such consolidation tools, like a standard container, are designed to ensure the cargo transportation safety during transshipment and transportation by the various means of transport, free and fast loading (unloading) of containers with cargo modules, as well as to limit unauthorized access to the cargo. Thus, the shipper will be able to take full advantage of modern container technologies.

The alternative options for consolidating groupage cargo directly in the “end” points of goods consolidation and distribution on the basis of the standard module are showed in the study and recommendations for the proposed cargo units implementation as the means of consolidation are provided.

The most rational way of organizing the groupage container cargoes transportation is proposed.

Keywords: groupage cargo, container technologies, consolidation and distribution of goods, means of consolidating cargo places.

For citation:

Izotov, Oleg A., Yuri I. Vasiliev, and Oleg A. Razhev. “Processes for forming groupage container consignments.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.

УДК 656.073.2

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ СБОРНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПАРТИЙ ГРУЗА

О. А. Изотов, Ю. И. Васильев, О. А. Ражев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Выполнен анализ становления, развития и осуществления экспедиторской деятельности региональными центрами консолидации (распределения) сборных партий контейнерных грузов как основных элементов современной контейнерной транспортной системы, сущность которых сводится к соединению пространства и времени при своевременной и безопасной доставке грузов с минимальными затратами. Раскрыты способы доставки сборных грузов на контейнерные терминалы из тыловых зон страны в условиях непрерывности транспортного процесса, требующего учета поведения внешней среды и рынка транспортных услуг. Рассмотрены существующие и предложены новые стратегические решения, направленные на формирование управляемой системы транспортировки. Раскрыты пути снижения общего количества перевалок малых партий грузов на пути внедрения в транспортную контейнерную систему. Выявлена роль транспортно-экспедиторского обслуживания отправок грузов в малотоннажных контейнерах.

Рассмотрены подходы к проблеме формирования новых стандартных грузовых единиц, органически вписывающихся в существующие контейнерно-технологические системы. Такие средства укрупнения, как стандартный контейнер призваны обеспечить сохранность перевозки грузов при перегрузке и транспортировке различными видами транспорта, свободную и быструю загрузку (выгрузку) контейнеров модулями с грузом, а также ограничить несанкционированный доступ к грузу. Таким образом, грузоотправитель сможет воспользоваться всеми преимуществами современных контейнерных технологий. Проведенное исследование показывает альтернативные варианты укрупнения сборных грузов непосредственно в «концевых» пунктах их консолидации и распределения на базе стандартного модуля и приведены рекомендации по внедрению предлагаемых грузовых единиц как средств укрупнения. В качестве пилотного проекта предложен наиболее рациональный способ организации перевозок сборных контейнерных грузов.

Ключевые слова: сборные грузы, контейнерные технологии, консолидация и распределение грузов, средства укрупнения грузовых мест

Для цитирования:

Изотов О. А. Процессы формирования сборных контейнерных партий груза / О. А. Изотов, Ю. И. Васильев, О. А. Ражев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.

Введение (Introduction)

Грузопотоки малых партий грузов, как правило, зарождаются в глубине материка с тем, чтобы затем влиться в мощный поток грузов, снабжающих хинтерланд морского порта. Поэтому от того, как будут организованы каналы передачи таких партий грузов в транспортных системах, зависит сохранность грузов, стоимость, сроки и своевременность их перевозки [1]. Основными элементами любой системы являются пути продвижения и передаточные пункты. Пунктами перевалки сборных партий грузов на территории России в разное время выступали следующие объекты: железнодорожные станции, открытые для приема сначала тарно-штучных грузов, а затем трех- и пятитонных контейнеров; тыловые контейнерные терминалы на базе станций, открытых для приема большегрузных контейнеров, а с начала XXI в. региональные центры (распорядительные склады и логистические центры временного хранения и переработки грузов) консолидации и распределения сборных грузов.

Региональные центры консолидации (распределения) грузов получили одну из ключевых ролей транспортной системы, сущность которой сводится к соединению пространства и времени при своевременной и безопасной доставке грузов с минимальными затратами. Они должны отвечать реалиям сложившегося в современном мире развития транспортных систем. Единая технология транспортировки предполагает непрерывность транспортного процесса, поэтому транспортный комплекс даже регионального уровня должен учитывать поведение внешней среды и рынка транспортных услуг и предлагать новые стратегические решения, направленные на формирование управляемой системы транспортировки. Таким образом, при создании транспортной сети наибольшее значение имеют функционал, уровень сервиса, услуг и терминалов, обеспечивающих прием, переработку и дальнейшую отправку грузов. При этом организация отправок именно сборных грузов через промежуточные терминалы в течение последних лет претерпела наиболее существенные изменения. В первую очередь, это коснулось порядка сдачи малых партий грузов на промежуточные пункты для дальнейшей отправки в контейнерах [2], поскольку именно на этом этапе грузоотправитель теряет возможность воспользоваться всеми преимуществами контейнерных перевозок. Выявленные противоречия и ограничения требуют всестороннего рассмотрения подходов к проблеме формирования грузовых единиц и разработке предложения по созданию новых стандартных грузовых единиц, способных органически вписаться в существующие контейнерно-технологические системы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

С появлением в 60-е гг. XX в. на рынке транспортных услуг трех- и пятитонных контейнеров малые партии грузов традиционно продолжали сдаваться на склад магистральных видов транспорта через транспортно-экспедиторские конторы железнодорожных станций, морских и речных

портов, а также трансакгентства. Необходимость промежуточного хранения была вызвана ожиданием попутного подвижного состава или свободных контейнеров. Дальнейшее развитие отправок грузов в малотоннажных контейнерах заключалось в расширении сферы услуг транспортно-экспедиторских контор. Железнодорожные станции, например, предоставляли автотранспорт для доставки порожнего контейнера под погрузку и сдачу задаренного контейнера на грузовую площадку станции. Время, выделенное на загрузку такого контейнера, строго регламентировалось, задержка влекла за собой наложение штрафных санкций, а сроки отправки контейнера попадали в зависимость от графиков работы железнодорожного транспорта [3].

Эффект масштаба привел к повсеместному внедрению крупнотоннажных контейнеров, вытеснивших с рынка услуг контейнеры малотоннажные. Доставка грузов на терминалы, обрабатывающие 20-футовые контейнеры, исключила из звеньев транспортной системы трех- и пятитонные контейнеры. Региональные центры получили монополию в сфере организации услуг по доставки малых партий грузов. Отправители малых партий грузов вынуждены завозить свои грузы в региональные центры консолидации (распределения) сборных партий для объединения отправок с товарами других владельцев в одном 20-футовом контейнере (рис. 1). Такие отправки сопровождаются усложнением оформления транспортных документов и других коммерческих операций. Грузоотправитель при этом вынужден соглашаться на дополнительные перегрузки своего груза с доступом к грузу на промежуточных этапах транспортировки работников транспорта и другими неудобствами, связанными с обеспечением безопасности и сохранности груза.

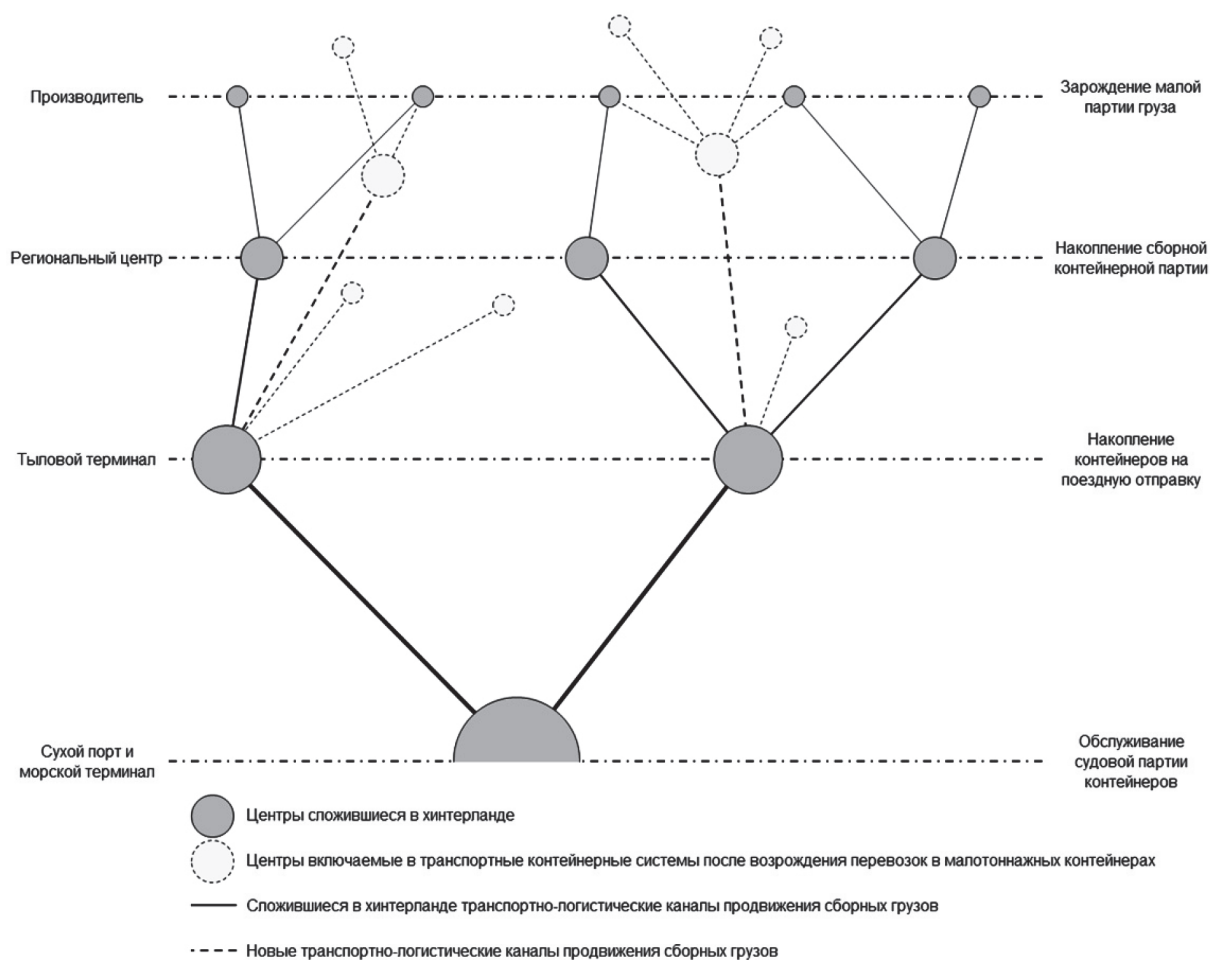


Рис. 1. Цепочки продвижения сборных грузов в хинтерланде

Рыночные отношения обуславливают повышение предъявляемых к транспорту требований относительно сокращения времени доставки при минимальных затратах на транспортировку.

В этих условиях важнейшим направлением повышения эффективности перевозок сборных грузов и конкурентоспособности в сфере транспортных услуг становится область построения взаимодействия видов транспорта в целях повышения провозной способности транспортных путей, сокращения количества перегрузок, повышения пропускной способности перегрузочных терминалов, организации информационных потоков и т. д. [4], [5].

Возможность освоения грузопотока сборных грузов на принципиально новой основе требует разработки новых средств укрупнения грузов, призванных обеспечить сохранность груза при максимальном использовании современных контейнерных технологий. Таким средством может явиться новое средство укрупнения малой партии груза, предложенное в качестве пилотного проекта специалистами кафедры «Порты и грузовые терминалы» Института международного транспортного менеджмента ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова [6].

Результаты (Results)

Внутриконтейнерный модуль (*Box in Box*), предназначенный для доставки малой партии груза, сокращения перегрузочных операций и перевозки грузов в 20-футовом контейнере, обеспечит объединение всех элементов сложившейся контейнерной транспортно-технологической системы в единое целое (рис. 2). Укладка малой партии груза в модуль, предоставленный для транспортировки региональным центром (экспедиторской компанией), предназначена для прямой или последующей перегрузки в большегрузный контейнер, что автоматически включает такой модуль в транспортную контейнерную систему доставки грузов [7].

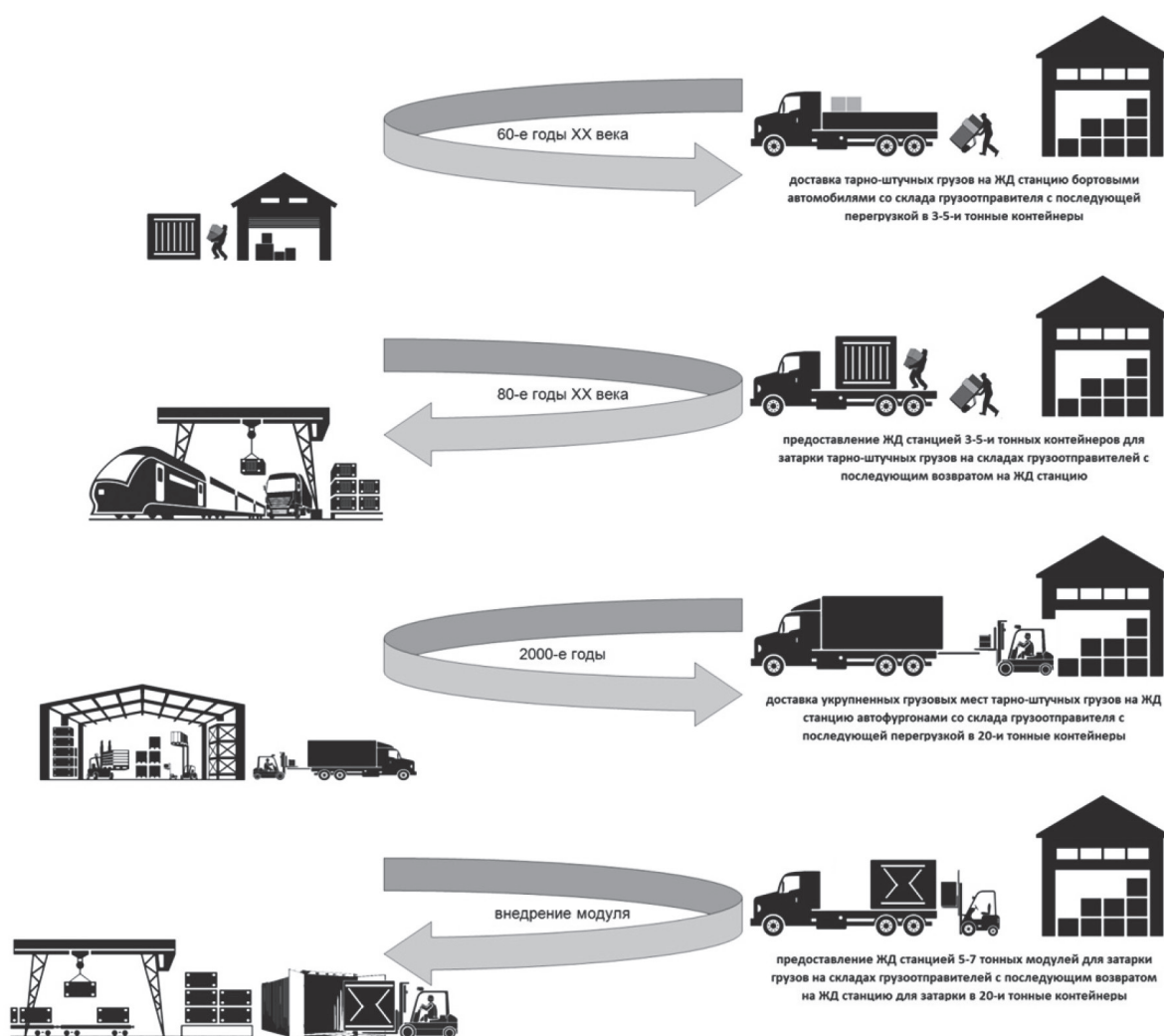


Рис. 2. Процессы формирования сборной партии грузов в региональном центре

Транспортирование грузов в модуле осуществляться всеми магистральными видами транспорта, сокращает общее количество перегрузочных операций и, как следствие, стоимость доставки грузов. При этом доставка модуля может производиться как в региональный центр для дальнейшей отгрузки модуля с грузов в большегрузный контейнер, так и сразу на тыловой терминал или контейнерный терминал порта, что обеспечит грузоотправителю гарантированное соблюдение сроков свободного использования морского контейнера и создаст предпосылки для приближения контейнерных услуг к грузовладельцам ранее лишенных такой возможности. В сферу деятельности региональных центров консолидации и распределения сборных грузов попадут новые грузоотправители и региональные центры получают возможность работать на большем отдалении от морского терминала [8]. В общем виде развитие сферы услуг региональных центров приводится в табл. 1 [9]–[15].

Таблица 1

**Этапы развития центров консолидации (распределения)
контейнерных сборных партий грузов**

Основные направления деятельности	Этапы развития			
	60-е гг. XX в.	80-е гг. XX в.	2000-е гг. по настоящее время	Внедрение внутриконтейнерного модуля
Стратегия развития	Появление транспортно-индустриальных центров	Расширение транспортно-индустриальных центров	Коммерческая ориентация, формирование интегральных транспортных центров	Расширение сервиса и услуг по предоставлению внутриконтейнерных модулей и транспортных средств для их доставки
Рамки деятельности	Разгрузка грузов, складирование, загрузка трех- и пятитонных контейнеров, отгрузка контейнеров железнодорожным транспортом	Предоставление трех- и пятитонных контейнеров под загрузку отправителю грузов, отгрузка контейнеров железнодорожным транспортом	Разгрузка малых партий грузов, складирование, объединение партий грузов в сборную отправку, загрузка двадцатифутовых контейнеров, отправка контейнеров видами транспорта	Предоставление внутриконтейнерных модулей под загрузку отправителю грузов, доставка модулей в региональный центр (тыловой терминал), загрузка модулей в двадцатифутовые контейнеры, отправка контейнеров видами транспорта
Производственные характеристики	Перевалочный центр на базе железнодорожной станции	Центр транспортно-экспедиторских услуг	Узловой центр транспортного коридора, переработка сборных партий грузов	Грузоинформационный транспортный коридор, многоцелевой сервис

Смоделируем процесс растарки контейнера в конечном пункте консолидации-распределения сборной партии грузов, т. е. выполним сравнение технологий погрузочно-разгрузочных операций по традиционным эксплуатационным показателям — затратам времени на перегрузку грузов из контейнера, включая внутритерминальное перемещение, в автофургон или на склад ($t_{\text{выгр}}$), и рассчитаем трудоемкость перегрузочных операций в машино-ч (T_p).

В общем виде задача будет выглядеть следующим образом. Пусть контейнер затарен сборной партией груза $k_{\text{сб}}$, которая может быть выражена в тарно-штучных грузах, сформированных на паллетах $k_{\text{УГМ}}$ (ед.), и тарно-штучных грузах без средств укрупнения (например, коробки или мешки) $k_{\text{ТШГ}}$ (т). Оценка затрат времени на растарку контейнера может быть выражена следующим образом:

$$T_{\text{УГМ}} = \frac{(k_{\text{УГМ}} \cdot n_{\text{УГМ}} \cdot t_{\text{УГМ}})}{60}, \quad (1)$$

где $T_{\text{УГМ}}$ — время растарки одного контейнера с укрупненными грузовыми местами (УГМ), ч;
 $n_{\text{УГМ}}$ — количество единиц укрупненных грузовых мест, одновременно обрабатываемых средством механизации (погрузчиком);

$t_{\text{УГМ}}$ — время цикла средства механизации, период обработки одной партии груза, мин,

Тогда время растарки одного контейнера с тарно-штучными грузами без укрупнения грузовых мест:

$$T_{\text{ТШГ}} = \frac{k_{\text{ТШГ}}}{M_{\text{ТШГ}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{ТШГ}}$ — время растарки одного контейнера с тарно-штучными грузами (ТШГ), ч;

$M_{\text{ТШГ}}$ — норма обработки тарно-штучных грузов по выбранному варианту работ (ручная выборка с применением средств механизации, например, ленточный конвейер), т/ч.

При затарке контейнера модулями со сборными партиями груза $n_{\text{мод}}$ (ед.), время растарки $T_{\text{мод}}$ может быть определено по формуле

$$T_{\text{мод}} = \frac{n_{\text{мод}} \cdot t_{\text{мод}}}{60}, \quad (3)$$

где $t_{\text{мод}}$ — время цикла средства механизации, период обработки одного модуля, мин.

Пример расчетов дан в форме табл. 2.

Таблица 2

**Сравнение погрузочно-разгрузочных операций
по традиционным эксплуатационным показателям**

Погрузочно-разгрузочные операции		Количество обрабатываемых контейнеров						
		1	5	10	15	20	25	30
УГМ	Загрузка одного контейнера УГМ, ед.	22	22	22	22	22	22	22
	Время перегрузки одного УГМ, мин	3	3	3	3	3	3	3
	Перегружено УГМ, ед.	22	110	220	330	440	550	660
	Перегрузка УГМ, машино-ч	1,1	5,5	11	16,5	22	27,5	33
ТШГ	Загрузка одного контейнера ТШГ, т-н	20	20	20	20	20	20	20
	Норма обработки ТШГ, т-н/ч	10	10	10	10	10	10	10
	Перегружено ТШГ, т	20	100	200	300	400	500	600
	Перегрузка ТШГ, машино-ч	2	10	20	30	40	50	60
Модули	Загрузка одного контейнера модулями, ед.	2	2	2	2	2	2	2
	Время перегрузки одного модуля, мин	15	15	15	15	15	15	15
	Перегружено модулей, ед.	2	10	20	30	40	50	60
	Перегрузка модулей, машино-ч	0,5	2,5	5	7,5	10	12,5	15

Поскольку модуль, так же, как и грузы, затаренные в контейнер, могут быть выгружены на любом этапе маршрута перевозки, что связано с достижением пункта назначения и истечением «свободных дней» пользования контейнерами, обозначим основные из них:

- морской терминал порта;
- тыловой терминал компании перевозчика;
- промежуточная железнодорожная станция, открытая (закрытая) для работы с контейнерами данной грузоподъемности;

- распорядительный (логистический) центр, являющийся грузополучателем или обслуживающий такового;
- склад грузополучателя.

Морской терминал, как правило, обрабатывает и отправляет по назначению сухопутными маршрутами опломбированные контейнеры. Однако на складе морского порта возможна перетарка грузов в транспорт грузовладельца или по его заявке в смежный вид транспорта при невозможности иной доставки. Тогда время обработки груза контейнера с УГМ при дальнейшей отправке железнодорожным транспортом составит, ч:

$$T_{\text{УГМ}}^{\text{обрМП}} = T_{\text{УГМ}} + t_{\text{хран}} + t_{\text{УГМ}}^{\text{погр.ваг}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{УГМ}}^{\text{погр.ваг}}$ — время погрузки УГМ в железнодорожный подвижной состав, ч.

Формула (1) рассчитывается через цикл работы погрузчика. Время обработки груза контейнера с УГМ при дальнейшей отправке автомобильным транспортом, составит, ч:

$$T_{\text{УГМ}}^{\text{обрМП}} = T_{\text{УГМ}} + t_{\text{хран}} + t_{\text{УГМ}}^{\text{погр.авто}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{УГМ}}^{\text{погр.авто}}$ — время погрузки УГМ в автомобильный подвижной состав, ч; рассчитывается через цикл работы погрузчика.

Тогда время обработки груза контейнера с ТШГ при дальнейшей отправке железнодорожным транспортом, составит, ч:

$$T_{\text{ТШГ}}^{\text{обрМП}} = T_{\text{ТШГ}} + t_{\text{хран}} + t_{\text{ТШГ}}^{\text{погр.ваг}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{хран}}$ — время хранения ТШГ на складе морского порта, время ожидания (накопления партии груза) погрузки в подвижной состав, ч;

$t_{\text{ТШГ}}^{\text{погр.ваг}}$ — время погрузки ТШГ в железнодорожный подвижной состав, ч; рассчитывается через норму обработки тарно-штучных грузов по выбранному варианту работ, формула (2).

Тогда время обработки груза контейнера с ТШГ при дальнейшей отправке железнодорожным транспортом, составит, ч:

$$T_{\text{ТШГ}}^{\text{обрМП}} = T_{\text{ТШГ}} + t_{\text{хран}} + t_{\text{ТШГ}}^{\text{погр.авто}}, \quad (7)$$

где $t_{\text{ТШГ}}^{\text{погр.авто}}$ — время погрузки ТШГ в автомобильный подвижной состав, час. Рассчитывается через норму обработки тарно-штучных грузов по выбранному варианту работ, формула (2).

Время обработки груза контейнера с новыми средствами укрупнения сборных грузов при дальнейшей отправке железнодорожным транспортом, составит, ч:

$$T_{\text{мод}}^{\text{обрМП}} = T_{\text{мод}} + t_{\text{хран}} + t_{\text{мод}}^{\text{погр.ваг}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{мод}}^{\text{погр.ваг}}$ — время погрузки модулей в железнодорожный подвижной состав, ч; рассчитывается через цикл работы крана по формуле (3).

Время обработки груза контейнера с новыми средствами укрупнения сборных грузов при дальнейшей отправке автомобильным транспортом, составит, ч:

$$T_{\text{мод}}^{\text{обрМП}} = T_{\text{мод}} + t_{\text{хран}} + t_{\text{мод}}^{\text{погр.авто}}, \quad (9)$$

где $t_{\text{мод}}^{\text{погр.авто}}$ — время погрузки УГМ в автомобильный подвижной состав, ч; рассчитывается через цикл работы погрузчика, формула (3).

При этом контейнер высвобождается сразу после окончания его растарки и в дальнейшей цепи продвижения товара не участвует.

Заключение (Conclusion)

Таким образом, внедрение внутриконтейнерных модулей в оборот сборных партий грузов направлено на реализацию следующих задач:

- включить перевозку малых партий грузов в единую транспортно-контейнерную систему;
- сократить погрузочно-разгрузочные операции с тарно-штучными грузами;
- исключить необходимость доставки 20-футовых контейнеров в региональные (распорядительные) центры;
- приблизить региональные центры, как пункты перевалки малых партий грузов непосредственно к грузоотправителям;
- обеспечить возможность отправки сборных партий грузов, следующих до разных пунктов потребления, в одном контейнере до тылового терминала страны назначения, что сократит время хранения грузов на терминале отправления в ожидании попутно отправки;
- снизить стоимость транспортировки малых партий грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Изотов О. А.* Технологические решения для организации отправок сборных грузов посредством контейнерных транспортно-технологических систем / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.
2. *Изотов О. А.* Перспективы экспедирования морских контейнерных перевозок / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, А. В. Гуляев // Транспортное дело России. — 2019. — № 4. — С. 130–133.
3. *Кузнецов А. Л.* Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.
4. *Кузнецов А. Л.* Моделирование развития портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — Т. 1. — № 3 (41). — С. 176–182.
5. *Иванова М. Б.* Снижение неопределенности характеристик рынка при стратегическом планировании в транспортно-экспедиторской компании / М. Б. Иванова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 4. — С. 207а–215.
6. *Изотов О. А.* Организация погрузочно-разгрузочных работ новых единиц укрупнения сборных грузов / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 813–822. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-813-822.
7. *Изотов О. А.* Преимущества внедрения новых средств укрупнения сборных грузов в контейнерные перевозки / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1037–1043. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1037-1043.
8. *Кузнецов А. Л.* Методы мягких вычислений для генерации неоднородных потоков событий в моделировании транспортных систем / А. Л. Кузнецов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4-4 (42). — С. 186–190.
9. *Schepler X.* Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port / X. Schepler, S. Balev, S. Michel, É. Sanlaville // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 100. — Pp. 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.
10. *Irannezhad E.* A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time / E. Irannezhad, C. Prato, M. Hickman // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 121. — Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.
11. *Saeed N.* Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines / N. Saeed, O. I. Larsen // Case Studies on Transport Policy. — 2016. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.
12. *Lv B.* Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport / B. Lv, B. Yang, X. Zhu, J. Li // Computers & Industrial Engineering. — 2019. — Vol. 129. — Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.
13. *Kuzmicz K. A.* Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation / K. A. Kuzmicz, E. Pesch // Omega. — 2019. — Vol. 85. — Pp. 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.
14. *Almetova Z.* Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes / Z. Almetova, V. Shepelev, S. Shepelev // Transportation Research Procedia. — 2017. — Vol. 27. — Pp. 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.

15. Lee C. Y. Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities / C. Y. Lee, D. P. Song // *Transportation Research Part B: Methodological*. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.

REFERENCES

1. Izotov, Oleg A., Aleksandr V. Kirichenko, and Aleksandr L. Kuznetsov. “Technological solutions for cargoes shipment through the container transport and technological systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.
2. Izotov, O., A. Kuznetsov, and A. Gulyaev. “The prospects for freight forwarding container shipping.” *Transport business of Russia* 4 (2019): 130–133.
3. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “The evolution of indicators describing the operation of ports and terminal.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 909–924. DOI: 10.21821/2309- 5180-2017-9-5-909-924.
4. Kuznetsov, Alexander L., and Alexander V. Galin. “Port development simulation.” *Marine Intellectual Technology* 1.3(41) (2018): 176–182.
5. Ivanova, M. B. “Reducing of unknown of marketing index in the process of strategic planning in forwarding company.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2011): 207a–215.
6. Izotov, Oleg A. “Organization of loading and unloading operations of new consolidated cargo units.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 813–822. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-813-822.
7. Izotov, Oleg A. “Advantages of introducing new means of consolidating groupage cargoes into container transportation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1037–1043. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1037-1043.
8. Kuznetsov, Alexander L., Oleg A. Isotov, Anton D. Semenov, and Sergey V. Smolencev. “Application of soft computing for generation of heterogeneous events flow in transport system modeling.” *Marine Intelligent Technologies* 4-4(42) (2018): 186–190.
9. Schepler, Xavier, Stefan Balev, Sophie Michel, and Éric Sanlaville. “Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 100 (2017): 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.
10. Irannezhad, Elnaz, Carlo Prato, and Mark Hickman. “A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 121 (2017): 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.
11. Saeed, Naima, and Odd I. Larsen. “Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines.” *Case Studies on Transport Policy* 4.2 (2016): 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.
12. Lv, Bowen, Bin Yang, Xiaolin Zhu, and Jun Li. “Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport.” *Computers & Industrial Engineering* 129 (2019): 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.
13. Kuzmicz, Katarzyna Anna, and Erwin Pesch. “Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation.” *Omega* 85 (2019): 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.
14. Almetova, Zlata, Vladimir Shepelev, and Sergey Shepelev. “Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes.” *Transportation Research Procedia* 27 (2017): 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.
15. Lee, Chung-Yee, and Dong-Ping Song. “Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities.” *Transportation Research Part B: Methodological* 95 (2017): 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Изотов Олег Альбертович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Izotov, Oleg A. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Васильев Юрий Иванович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vui@baltex.spb.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Ражев Олег Альбертович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: razhev@mail.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Vasiliev, Yuri I. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vui@baltex.spb.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Razhev, Oleg A. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: razhev@mail.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2020 г.

Received: February 20, 2020.

GEOID APPROXIMATION BY SPLINE FUNCTIONS METHODS**I. V. Yuyukin**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The conception of navigational space has been actualized by ship's positioning with three fixed coordinates on the «marine geoid» geodetic base. With the advent of innovative computer technologies becomes possible to refuse from the widely used in navigation the approach of geometric primitivities and to utilize practically such factual attributes as approximated isosurface and interpolated isoline. The mistake of the marine mobile object space-time position arising from the mathematical manipulation of substitution the real complex geoid figure by simple two-axis ellipsoids for avoiding the complexity of the calculation scheme may cause a navigation accident. It is assumed that any illusory representation about the concept of Euclidean space for water transport logistics forms the hidden threat of a mathematically programmed emergency situation. The foreshortened screenshot of synthesized geoid isosurface is shown as the fragment of model of the liquid planet state within the concept of navigation continuum. The issue of the approximation accuracy is investigated in 3D format with a specially organized experiment. It is proposed optimally to take into account dynamically changed the «pear-shaped» Earth with the effects of gravitational pulsating undulations based on the developed hybrid method. With the spline approach, there is no need to change the mathematical apparatus of the «functions-roofs» as such with a real algorithmic possibility of reconstructing the refined Earth gravitational appearance. In modern conditions, a practicing navigator is faced with the need to identify an ellipsoid activated in a satellite equipment with a datum of marine navigation or vector electronic chart. While determining the ship location using traditional methods, the seafarer is obliged to make corrections to the coordinates from the legend of the paper chart if the geodetic systems don't match. It is noted that it becomes possible to solve the problem radically when marine logistics is reoriented to the spline geoid model with the condition that cartography is repurposed on the new mathematical basis. When using the spline model of the geoid, there is a real opportunity to free the watch officer from the routine procedures of transforming coordinates for different ellipsoids. This automatically increases the safety standards of modern navigation. A trivial conversion of coordinates to another geodesic basis creates the probability of a navigation error precedent. When manually correcting electronic charts based on notices to mariners, the transition from the ellipsoid of paper chart to the world ellipsoid is implemented by entering modifications with the reverse sign to the geographical latitude and longitude, which can provoke a navigator's omission with possible serious consequences. With the software implementation of algorithms of the advanced technology of the function approximation theory in the onboard computer, a paradigm of absolute navigational accuracy with the possibility of abstracting from dubious mathematical stylizations is formed.

Keywords: navigational space, «pear-shaped» Earth, gravitational geoid undulations, «functions-roofs», paradigm of absolute accuracy.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Geoid approximation by spline functions methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.

УДК 656.61.052 656**АППРОКСИМАЦИЯ ГЕОИДА МЕТОДАМИ СПЛАЙН-ФУНКЦИЙ****И. В. Ююкин**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Актуализирована концепция навигационного пространства позиционированием судна тремя фиксированными координатами на геодезической основе «морского геоида». С появлением инновационных компьютерных технологий появляется возможность отказаться от повсеместно применяемого в судоходстве подхода геометрических примитивизаций и практически использовать такие фактические атрибуты, как аппроксимированная изоповерхность и интерполированная изолиния. Ошибка простран-

ственно-временного положения морского подвижного объекта, возникающая при математической манипуляции замещения реальной сложной фигуры геоида простыми двухосными эллипсоидами во избежание сложности схемы вычисления, может явиться причиной навигационной аварийности. Предполагается, что любое иллюзорное представление о концепции евклидова пространства для логистики водного транспорта формирует скрытую угрозу математически запрограммированной аварийной ситуации. Демонстрируется ракурсный скриншот синтезированной геоидной изоповерхности как фрагмента модели жидкого состояния планеты в рамках концепции навигационного континуума. Исследован вопрос точности аппроксимации в 3D формате при специально организованном оригинальном эксперименте. Предлагается оптимальным образом учитывать динамически изменяющуюся грушевидность Земли с эффектами гравитационных пульсирующих ундуляций на основе разработанного гибридного метода. При сплайновом подходе отсутствует необходимость изменения математического аппарата «функций-крыши» как такового при реальной алгоритмической возможности реконструкции уточненного гравитационного облика Земли. В современных условиях практикующий штурман поставлен перед необходимостью идентификации активированного в спутниковом оборудовании эллипсоида с датумом морской навигационной или векторной электронной карты. При определении места судна традиционными способами мореплаватель обязан вводить поправки в координаты с легенды бумажной карты при несовпадении геодезических систем. Отмечается, что решить проблему кардинальным образом становится возможным при переориентировании морской логистики на сплайновую геоидную модель с условием перепрофилирования картографии на новую математическую основу. При использовании сплайновой модели геоида появляется реальная возможность освободить вахтенного помощника от рутинных процедур трансформации координат для различных эллипсоидов, что автоматически повышает стандарты безопасности современного судовождения. Тривиальный пересчет координат на другую геодезическую основу создает вероятность прецедента навигационной ошибки. При ручной корректуре электронных карт по извещениям мореплавателям переход от эллипсоида бумажной карты к мировому эллипсоиду реализуется введением поправок с обратным знаком к географической широте и долготе, что может спровоцировать упущение судоводителя с возможными серьезными последствиями. При программной реализации в бортовом компьютере алгоритмов прогрессивной технологии теории приближения функций формируется парадигма абсолютной точности навигации при возможности абстрагирования от сомнительных математических стилизаций.

Ключевые слова: навигационное пространство, «морской геоид», жидкое состояние планеты, грушевидность Земли, гравитационные пульсирующие ундуляции, «функции-крыши», парадигма абсолютной точности.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Аппроксимация геоида методами сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.

Введение (Introduction)

В настоящее время расчет геоида остается трудной математической задачей [1]–[3]. Гравитационная неравномерность Земли приводит к различной направленности отвесных линий, что в основном определяет неправильную грушевидную форму нашей планеты [4], которую немецкий профессор Иоганн Бенедикт Листинг определил как *геоид* [5] в 1873 г. [6]. Грушевидность Земли, инструментально обнаруженная только в XX в. по результатам гравиметрических спутниковых измерений, интуитивно была предсказана еще в XV в. Христофором Колумбом.

В современной практике судовождения используют двухосный эллипсоид, оптимальным образом ориентированный в форме геоида [7]. При этом фактическое перемещение любого судна происходит в трехмерном навигационном пространстве по эквипотенциальной поверхности земного поля тяжести. Морской подвижный объект движется по водной акватории, визуальной ассоциируемой судоводителем с плоскостным судовождением по прямой аналогии с картинной навигацией по морской навигационной карте. Фактически любой регион плавания является фрагментом реальной поверхности нашей планеты, а следовательно, перемещение судна должно концептуально соотноситься с движением в трехмерном евклидовом пространстве по поверхности среднего уровня вод, мысленно продолженной под материками. Маршрутное плавание, ориентированное на геодезическую основу так называемого «морского геоида» [8], безусловно, необходимо рассматривать геометрически в рамках концепции навигационного пространства. При этом

каждая мгновенная позиция судна в навигационном пространстве фиксируется тремя координатами, а не двумя, как это традиционно принято считать.

Абстрагированная вертикальная координата современного судовождения определяет высотное положение судна как отклонение в данной точке евклидова пространства уровенной изоповерхности геоида от условной стандартизированной сфероидной поверхности. Однако третью координату необходимо использовать в любом случае при заходе или выходе из порта при учете влияния приливо-отливных явлений, определяющих безаварийное прохождение судна в стесненных навигационных обстоятельствах. На практике судоводитель практически учитывает вертикальность позиции судна в традиционном варианте использования таблиц приливов или их электронных аналогов для расчета безопасного запаса глубины под килем. Классические горизонтальные координаты в виде географической широты и долготы обычно ассоциируются с плоскостной навигацией в границах используемой в данный момент морской карты. Но действительное навигационное пространство определяется трехкоординатным позиционированием судна по сложной поверхности геоида. Любое непонимание концепции навигационного пространства может явиться скрытой угрозой возможной математически запрограммированной аварии.

Навигационное пространство характеризуется евклидовой метрикой, практически используемой в судовождении в виде оптимальной траектории из отрезков геодезических линий, кратчайшим образом соединяющих точки маршрутизации судна по изоповерхности геоида. Прямолинейное движение судна по локсодромии на карте в меркаторской проекции является упрощенной геометрией, поэтому стремление к упрощению объясняется сопутствующей причиной применимости в практических целях простого математического аппарата. По условной схеме линеаризации действительную геоидную форму Земли заменяют оптимально подобранной по размерам и ориентировке правильной фигурой с известной формализацией — эллипсоидом вращения [7], затем с учетом искажений переходят к сфере, а от глобуса — к плоскости. Плоская модель навигационного пространства в привычном судоводительском понимании — это морская бумажная карта, которая на протяжении ряда столетий находила традиционное применение для повседневного использования на штурманском столе. Однако все обозначенные геометрические трансформации автоматически накапливают методическую ошибку с возможными серьезными последствиями от ее абстрагирования.

Процесс линеаризации продолжается и в плоскостных границах морской навигационной карты, когда для упрощения процедуры определения места судна фактическую изолинию предлагается заменять в районе счислимой точки обычной прямой линией по *методу линий положения*, так как пересечение двух прямых в одной точке, условно принимаемое за обсервацию, рассчитать математически проще, чем определить точку пересечения двух плоских кривых. Ошибка местоположения от такой геометрической манипуляции потенциально содержит угрозу аварии взамен относительной простоты схемы вычисления.

В условиях современности с появлением инновационных компьютерных технологий появилась реальная возможность отказаться от подхода линеаризации и применять на водном транспорте такие фактические объекты, как *аппроксимированные изоповерхности* [4], [9] и *интерполированные изолинии* [7], [10]. При программной реализации в бортовом компьютере алгоритмов на основе прогрессивной технологии теории приближения функций становится возможным оперировать с абсолютной точностью практической навигации, отказавшись от сомнительных математических стилизаций.

В парадигме практического применения концепции навигационного пространства сформулированы следующие задачи:

1. Алгоритмизация аппроксимации геоидной изоповерхности с позиций гибридного сплайнового подхода.
2. Компьютерное моделирование фрагмента эквипотенциальной поверхности нашей планеты.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящее время известно 170 различных вариантов геодезических систем, и в спутниковом приемнике модели GP-500 японской фирмы Furuno все многообразие эллипсоидов зарезервировано в оперативной памяти с возможностью выбора судоводителем любой геодезической основы элементарным вводом трехзначного кода [11]. Практически у каждой страны, интегрированной в логику международного судоходства, появилось получившее широкую известность нововведение в виде референц-эллипсоида как упрощенной государственной модели геоида с целью репродуцирования морских карт с минимальными искажениями на национальных территориях с учетом специфики географических особенностей.

Показательной является официальная статистика погрешностей, обусловленных различием параметров применяемых многообразий эллипсоидов и результирующего вследствие этого расхождения используемых в математическом обеспечении систем координат спутниковых приемников с системами координат картографических основ путевых карт. Расхождение координат, из-за использования различных эллипсоидов в морях Европы, Южной Азии, Южной Америки и Австралии, составляет 0,1 мили, в водах Северной Америки — 0,25 мили, в водах Японии, Южной и Восточной Африки — 0,4 мили [12]. Погрешность, обусловленная разностью параметров референц-эллипсоидов, может быть обнаружена только апостериорно с помощью оценки точности при нанесении спутниковой обсервации на бумажную карту.

Модель двумерной B -сплайновой аппроксимации геоидной поверхности в первом приближении реализуется линейной комбинацией [4]:

$$\sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j} = F_{q,r} \quad q = 1, \dots, z_1; r = 1, \dots, z_2,$$

где z_1, z_2 — максимальное число дискретных измерений навигационных параметров.

Оптимизированный гибридный алгоритм и геометрическая интерпретация интерполяции фрагмента гипотетической навигационной изоповерхности приводятся в работе [9].

При практическом применении B -сплайна, обеспечивающего максимальную точность приближения навигационной изоповерхности, необходимо введение дополнительного функционала [9] по методу наименьших квадратов:

$$\sum_{q=1}^g \sum_{r=1}^h \left[F_{q,r} - \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j} \right]^2 \leq S,$$

где S — эмпирический параметр сглаживания, определяемый пользователем интуитивно в интерактивном режиме по конечному результату восстановления навигационной изоповерхности.

Эфемерное представление коэффициента S проявляется в сопоставимости с неким условным ключом, удачно повернув который можно получить удовлетворительную аппроксимацию данных. Процедура оптимального выбора коэффициента S и объяснение физического смысла данного параметра подробно рассмотрены в работе [9].

Результаты (Results)

Даже при точном выборе размеров эллипсоида и оптимальном его ориентировании в фигуре геоида максимальные отклонения эквипотенциальной поверхности характеризуются цифрой в пределах 100 м [3], [6] выше и ниже уровня эллипсоида, известные в научных публикациях как *ундуляции геоида* [13]. На физическом уровне такие аномалии объясняются неоднородностями распределения магматических масс в верхней мантии Земли вследствие незначительного ее удаления от океана по сравнению с центром масс нашей планеты [13]. Таким образом, фигура геоида геометрически образно пульсирует и не остается хронологически неизменной за счет постоянной динамики планетарных геологических процессов при учете непрерывного фактора перемещения гравитационных масс внутри Земли.

Одной из аномалий является понижение геоида на 106 м в морской окрестности острова Шри-Ланка [14]. Научное объяснение дефицита гравитационной массы, провоцирующего данный феномен, представляет одну из серьезных проблем современной геодезии. Однако эту проблему геофизикам удалось решить на основе компьютерного моделирования конвективных потоков, циркулирующих в земной мантии [15]. Краткое объяснение проблемы сводится к тому, что раскаленный и более легкий магматический материал поднимается наверх к поверхности, а холодный и более плотный опускается вниз по направлению к центру Земли. Аномалия Индийского океана проявляется за счет избытка в географическом районе горячего магматического вещества [16]. Подобный избыток связан с дрейфом Индии от Африки. Индия, в геологических масштабах удаляясь от Африки, направляет отдельную часть мантийных потоков на восток в центр аномалии в Индийском океане, что объясняет наблюдаемый гравитационный эффект. Гипотеза о движении континентов основывается на объяснении влияния тангенциальных массовых сил в континентальной земной коре, провоцирующего возникновение движения литосферных плит [17]. Другой аномалией является повешение геоида на 85 м [18] в районе Исландии. Диапазон максимальных ундуляций геоида составляет, таким образом, интервал от –106 м до +85 м и по абсолютной величине равен 191 м при рассмотрении отклонений геоида от эллипсоида WGS84 (World Geodetic System 1984) [18].

В современной практике судовождения необходимо акцентировать внимание мореплавателей на географическое нахождение судна в аномальных зонах геоида. Анализ неровностей эквипотенциальной изоповерхности дает основание предполагать вероятность фактора личных ошибок судоводителей при традиционных наблюдениях с использованием средств мореходной астрономии в указанных районах вследствие фактической иллюзорности видимого горизонта, на который ориентирована технология измерения высот небесных светил секстаном.

В настоящее время аномальные зоны геоида находятся под пристальным изучением современной геодезии, используются полномасштабные технические возможности спутниковых альтиметрических наблюдений GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) и GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) [8], организуются морские экспедиции, в которых выполняются географически локальные уточняющие гравиметрические измерения с целью определения реального гравитационного поля Земли. В случае обнаружения расхождений измерительных данных с общепринятой моделью автоматически появится необходимость реконструкции геоида [19]. Эффекты аномальных гравитационных пульсаций геоида оптимальным математическим образом могут учитываться при использовании унифицированного гибридного сплайнового алгоритма без какого-либо алгоритмического переформатирования при исключительной модификации файла исходных данных. На основе новой информации измерений уточненная форма геоида будет пересчитана тем же высокоскоростным методом *B*-сплайнов в комбинации со сплайнами лагранжева типа [7], без каких-либо конструктивных сложностей. В режиме реального времени обновления спутниковой информации появляется возможность использования в практических приложениях уточненной синтезированной изогеометрии геоида.

При алгоритмизации перспективных задач судовождения дополнительно предлагается использовать свойство локальности сплайнов с частичной возможностью организации расчётов по явным формулам [7] в уникальных случаях. Экстремальным свойствам локальной аппроксимации следует отдать предпочтение при исключительной сложности дискретных измерительных данных. При этом спутниковая информация подвергается сглаживанию, что может быть важным, когда в измерениях радионавигационных параметров присутствует хаотичная погрешность. Локальную интерполяцию организует простая математическая перестановка сплайновых линейных функционалов с навигационными параметрами [7]:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{N+1} f_i L_i(x); \quad S(x) = \sum_{i=0}^{N+1} f_i B_i(x).$$

На основе разработанного гибридного алгоритма выполнено компьютерное моделирование фрагмента электронного профиля геоида. Геометрическая интерпретация вычислительных

реализаций алгоритма гибридной сплайн-аппроксимации апробируется построением на дисплее компьютера электронных перспектив геоида в различных ракурсах в мультипликативном режиме с целью демонстрации работоспособности предлагаемого алгоритмизированного аппарата (рис. 1). Графическое воспроизведение каждой изолинии геоидной поверхности означает демонстрацию алгоритмической возможности вычисления мгновенного значения навигационной функции в каждой точке синтезированной линии с последующей пиксельной визуализацией битовой карты матрицы изолинии как частного случая навигационной изоповерхности.

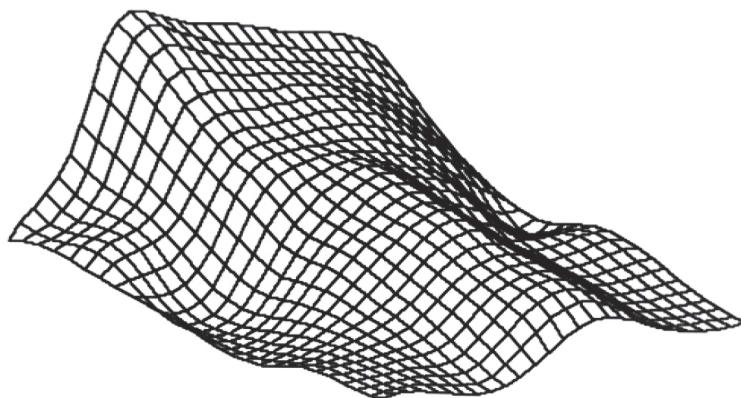


Рис. 1. Скриншот фрагмента электронной перспективы геоидной изоповерхности, синтезированной гибридным двумерным сплайном

Исследован вопрос вычислительной точности комбинированного алгоритма в тестовом эксперименте при решении задачи сплайнового восстановления поверхности сегмента сферы на сеточном патче размером 30×30 узловых значений (рис. 2). Сфера выбрана в качестве объекта оригинального исследования по факту представления поверхности постоянной гауссовой кривизны, что обеспечивает возможность получения реалистичных оценок точности сплайн-аппроксимации.

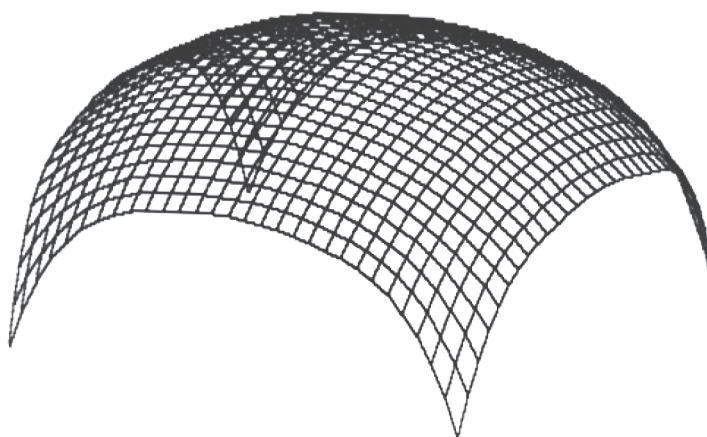


Рис. 2. Скриншот аппроксимированного сплайнового сегмента сферы

Точностные характеристики выводились на компьютерный дисплей при помощи задания в паскаль-программе специального логического условия по расчету абсолютной максимальной разницы между фиксированным значением функции как результата расчета по стандартной формуле сферы и вычислением сплайнового аппроксимированного значения в каждом сеточном узле. По результатам проведенного эксперимента точность расчета на центральной части сферического сегмента обеспечивается в числовом диапазоне 10^{-6} – 10^{-8} условных разностных единиц, и только в четырех концевых позициях задания краевых условий (рис. 3) наблюдается

всплесковое повышение погрешности до 10^{-2} – 10^{-3} указанных единиц. Полученные результаты оценки точности графически демонстрируются графиком объемной погрешности аппроксимации в перспективном ракурсе (см. рис. 3). Параметр сглаживания S [9] задавался в данном эксперименте равным 0,5 как интуитивный оптимум, определенный автором в интерактивном режиме.

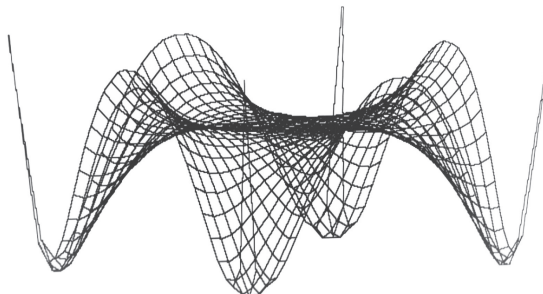


Рис. 3. Скриншот объемной погрешности аппроксимации сферического сегмента двумерным В-сплайном ($S = 0,5$)

Поскольку при оптимальном ориентировании эллипсоида вращения в фигуре геоида ундуляции характеризуются цифрой в пределах 100 м [3], представляется возможным оперировать в практических приложениях навигации оценкой точности в метрической системе вычисления геоидной поправки в алгоритмических пределах 10^{-2} – 10^{-8} м. На рис. 3 отчетливо различимы четыре характерных всплеска погрешности на концевых участках сферического сегмента, понижающие точность аппроксимации до 10^{-2} – 10^{-3} м. Центровка изображений на графических копиях с компьютерного дисплея задается специальными масштабирующими коэффициентами.

Обсуждение (Discussion)

Многообразие существующих картографических основ усложняет правильный выбор вахтенного помощника и усложняют его обязанность проверки идентичности активированного в спутниковом приемоиндикаторе эллипсоида с легендой бумажной или векторной карты при условии использования электронной картографической навигационно-информационной системы (ЭКНИС). Решить проблему кардинальным образом с целью устранения потенциальной ошибки геодезической основы можно только переходом на сплайновую геоидную модель при обязательном условии перепрофилирования картографии на новую математическую основу. В случае применения в современном судовождении сплайновой модели геоида нивелируется различие систем координат, определяемое разными параметрами эллипсоидов, взятых за математическую основу при производстве бумажной или электронной карты.

В современной навигационной практике судоводитель обязан акцентировать внимание на необходимости ввода поправок в координаты при изучении легенды бумажной карты. Как правило, на карте указываются поправки для перехода от системы координат WGS-84 к системе координат бумажной карты, что позволяет обозначить сравнительно точную спутниковую обсервацию. При этом вахтенный помощник должен удостовериться в использовании эллипсоида WGS-84 в опциях настройки спутникового приемоиндикатора и ЭКНИС.

Штурман поставлен каждый раз во время вахты перед необходимостью установления идентичности активированных в приемоиндикаторе эллипсоида и датума навигационной карты. Ситуация усугубляется тем, что в легенде некоторых бумажных карт дается информация о поправках от отличного WGS-84 эллипсоида. В данном случае необходим детальный анализ получения суммарных поправок или нужна дополнительная информация для перехода от WGS-84 на другой эллипсоид, параметры которого использовались при изготовлении данной бумажной карты. Оптимального эффекта в судовых условиях можно добиться, если изменить настройку приемоиндикатора спутниковой системы на указанный в легенде карты эллипсоид или вводить поправки на основе информации легенды бумажной карты.

Выводы (Summary)

1. В случае применения геоидной модели апробируется ситуация использования одной сплайновой геодезической модели в различных приложениях в случае переориентации производства компьютерных картографических систем на новую математическую основу. При этом возникает унификация деятельности вахтенного помощника ввиду безаварийной работы в одной математической парадигме при обеспечении абсолютной точности судовождения. Важный результат заключается в возможности значительного сокращения объема необходимой для хранения измерительной информации. При восстановлении навигационной изоповерхности на первый план выступают преимущества нетрадиционных для математических основ судовождения базисных сплайнов по фактору алгоритмической возможности экономии оперативной памяти бортового компьютера. Из-за конструктивной особенности базисной структуры «функций-крыш» [20], объем хранимой навигационной информации сокращается в 4 раза по сравнению, например, с алгоритмом классической полиномиальной сплайн-интерполяции [10].

2. В случае реализации варианта хранения программных модулей в памяти бортовых вычислительных средств обеспечивается преимущество в оперативной возможности корректировки массива данных спутниковых измерений по мере обновления информации. При этом достигается высокая точность пульсирующих вычислений геоидной поправки вследствие возможности использования уточненных измерений контрольных станций спутникового слежения.

3. Способ хранения информации в судовом компьютере исключает проблему модернизации приемоиндикатора навигационной системы при необходимости обновления измерительной информации.

4. Особенная проблематика восстановления геоида заключается в пульсирующей форме уровенной поверхности Земли за счет непрерывных гравитационных флуктуаций. Однако при применении сплайновой аппроксимации нет необходимости переформатировать гибридный алгоритм в случае обнаруженных изменениях формы геоида — обновляется только матрица, сформированная из правых частей системы алгебраических уравнений [9] и на основе прежних формул сплайн-функций синтезируется новый геометрический облик фигуры Земли. Таким образом, разработанный подход является методом многоразового использования с долгосрочной перспективой применения при возможности аппроксимации грушевидной планетарной формы с пульсирующей динамикой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sanso F.* The geoid today: still a problem of theory and practice / F. Sanso, R. Barzaghi, D. Carrion // VII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. — Vol. 137. — Pp. 173–180. DOI: 10.1007/978-3-642-22078-4_26.
2. *Barzaghi R.* GEOMED2: high-resolution geoid of the mediterranean / R. Barzaghi, D. Carrion, G.S. Vergos, I.N. Tziavos, V.N. Grigoriadis, D. A. Natsiopoulos, S. Bruinsma, F. Reinquin, L. Seoane, S. Bonvalot, M. F. Lequentrec-Lalancette, C. Salaün, O. Andersen, P. Knudsen, A. Abulaitijiang, M. H. Rio // International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World. — Springer, Cham, 2018. — Vol. 149. — Pp. 43–49. DOI: 10.1007/1345_2018_33.
3. *Kopeikin S.M.* Reference Ellipsoid and Geoid in Chronometric Geodesy / S.M. Kopeikin // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. — 2016. — Vol. 3. — Pp. 5. DOI: 10.3389/fspas.2016.00005.
4. *Ююкин И. В.* Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
5. *Chicaize E. G.* Spatial uncertainty of a geoid undulation model in Guayquil, Ecuador / E. G. Chicaize, C. A. Leiva, J. J. Arranz, X.E. Buenano // Open Geosciences. — 2017. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 255–265. DOI: 10.1515/geo-2017-0021.

6. Kopeikin S. M. Towards an exact relativistic theory of Earth's geoid undulation / S. M. Kopeikin, E. M. Mazurova, A. P. Karpik // *Physics Letters A*. — 2015. — Vol. 379. — Is. 26–27. — Pp. 1555–1562. DOI: 10.1016/j.physleta.2015.02.046.
7. Ююкин И. В. Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
8. Muller J. High Performance Clocks and Gravity Field Determination / J. Muller, D. Dirkx, S. M. Kopeikin, G. Lion, I. Panet, G. Petit, P. N. A. M. Visser // *Space Sciences Reviews*. — 2018. — Vol. 214. — Is. 1. — Pp. 5. DOI: 10.1007/s11214-017-0431-z.
9. Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
10. Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
11. Furuno operator's manual GPS NAVIGATOR model GP-500. — Nishinomiya: Furuno Electric Co., Ltd., 1989. — 65 p.
12. Рекомендации по организации штурманской службы на судах. — СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 1999. — Вып. № 13. — 152 с.
13. Condie K. C. Earth as an Evolving Planetary System / K. C. Condie. — Elsevier Academic Press, 2015. — 430 p. DOI: 10.1016/C2015-0-00179-4.
14. Ningthoujam L. S. Seismologists Search for the Indian Ocean's "Missing Mass" / L. S. Ningthoujam, S. S. Negi, D. K. Pandey // *Earth & Space Science News*. — 2019. — Vol. 100. DOI: 10.1029/2019EO120243.
15. Ghosh A. The Importance of Upper Mantle Heterogeneity in Generating the Indian Ocean Geoid Low / A. Ghosh, G. Thyagarajulu, B. Steinberger // *Geophysical Research Letters*. — 2017. — Vol. 44. — Is. 19. — Pp. 9707–9715. DOI: 10.1002/2017GL075392.
16. Reiss A. S. A hot midmantle anomaly in the area of the Indian Ocean Geoid Low / A.-S. Reiss, C. Thomas, J. Driel, B. Heyn // *Geophysical Research Letters*. — 2017. — Vol. 44. — Is. 13. — Pp. 6702–6711. DOI: 10.1002/2017GL073440.
17. Rebetsky Yu. L. On small tangential mass forces that may exist in the lithosphere. Their role in tectonics and geodynamics / Yu. L. Rebetsky // *Geodynamics & Tectonophysics*. — 2016. — Vol. 7. — Is. 4. — Pp. 691–704. DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0229.
18. Okiwelu A. A. Determination of Nigerian geoid undulations from spherical harmonic analysis / A. A. Okiwelu, E. E. Okwueze, I. O. Ude // *Applied Physics Research*. — 2011. — Vol. 3. — Is. 1. — Pp. 8–14. DOI: 10.5539/apr.v3n1p8.
19. Kopeikin S. Normal gravity field in relativistic geodesy / S. Kopeikin, I. Vlasov, W. B. Han // *Physical Review D*. — 2018. — Vol. 97. — Is. 4. — Pp. 045020. DOI: 10.1103/PhysRevD.97.045020.
20. Квасов Б. И. Методы изогеометрической аппроксимации сплайнами: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Б. И. Квасов. — Новосибирск, 1997. — 34 с.

REFERENCES

1. Sanso, Fernando, Riccardo Barzaghi, and Daniela Carrion. "The geoid today: still a problem of theory and practice." *VII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy*. Vol. 137. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. 173–180. DOI: 10.1007/978-3-642-22078-4_26.
2. Barzaghi, R., D. Carrion, G. S. Vergos, I. N. Tziavos, V. N. Grigoriadis, D. A. Natsiopoulou, S. Bruinsma, F. Requin, L. Seoane, S. Bonvalot, M. F. Lequentrec-Lalancette, C. Salaün, O. Andersen, P. Knudsen, A. Abulaitijiang, and M. H. Rio. "GEOMED2: high-resolution geoid of the mediterranean." *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World*. Vol. 149. Springer, Cham, 2018. 43–49. DOI: 10.1007/1345_2018_33.
3. Kopeikin, Sergei M. "Reference Ellipsoid and Geoid in Chronometric Geodesy." *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 3 (2016): 5. DOI: 10.3389/fspas.2016.00005.
4. Yuyukin, Igor V. "Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.

5. Chicaize, Elena G., Cesar A. Levina, Jose J. Arranz, and Xavier E. Buenano. "Spatial uncertainty of a geoid undulation model in Guayquil, Ecuador." *Open Geosciences* 9.1 (2017): 255–265. DOI: 10.1515/geo-2017-0021.
6. Kopeikin, Sergei M., Elena M. Mazurova, and Alexander P. Karpik. "Towards an exact relativistic theory of Earth's geoid undulation." *Physics Letters A* 379.26-27 (2015): 1555–1562. DOI: 10.1016/j.physleta.2015.02.046.
7. Yuyukin, Igor V. "Interpolation of the navigational function by the Lagrange type spline." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.1 (2020): 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
8. Muller, Jorgen, Dominic Dirkx, Sergei M. Kopeikin, Guillaume Lion, I. Panet, G. Petit, and P. N. A. M. Visser. "High Performance Clocks and Gravity Field Determination." *Space Sciences Reviews* 214.1 (2018): 5. DOI: 10.1007/s11214-017-0431-z.
9. Yuyukin, Igor V. "Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
10. Yuyukin, Igor V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
11. *Furuno operator's manual GPS NAVIGATOR model GP-500*. Nishinomiya: Furuno Electric Co., Ltd., 1989.
12. *Recommendations for organization of navigational service*. Is. 13. SPb.: ZAO TSNIIME, 1999.
13. Condie, Kent C. *Earth as an Evolving Planetary System*. Elsevier Academic Press, 2015. DOI: 10.1016/C2015-0-00179-4.
14. Ningthoujam, Lachit S., Sanjay S. Negi, and Dhananjai K. Pandey. "Seismologists Search for the Indian Ocean's "Missing Mass"." *Earth & Space Science News* 100 (2019). DOI: 10.1029/2019EO120243.
15. Ghosh, Attreyee, G. Thyagarajulu, and Bernhard Steinberger. "The importance of upper mantle heterogeneity in generating the Indian Ocean geoid low." *Geophysical Research Letters* 44.19 (2017): 9707–9715. DOI: 10.1002/2017GL075392.
16. Reiss, Anne-Sophie, Christine Thomas, Jac van Driel, and Bjorn Heyn. "A hot midmantle anomaly in the area of the Indian Ocean Geoid Low." *Geophysical Research Letters* 44.13 (2017): 6702–6711. DOI: 10.1002/2017GL073440.
17. Rebetsky, Yuri L. "On small tangential mass forces that may exist in the lithosphere. Their role in tectonics and geodynamics." *Geodynamics & Tectonophysics* 7.4 (2016): 691–704. DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0229.
18. Okiwelu, A. A., E. E. Okwueze, and I. O. Ude. "Determination of Nigerian geoid undulations from spherical harmonic analysis." *Applied Physics Research* 3.1 (2011): 8–14. DOI: 10.5539/apr.v3n1p8.
19. Kopeikin, Sergei, Igor Vlasov, and Wen-Biao Han. "Normal gravity field in relativistic geodesy." *Physical Review D* 97.4 (2018): 045020. DOI: 10.1103/PhysRevD.97.045020.
20. Kvasov, Boris I. *Metody izogeometricheskoy approksimatsii splaynami*. Abstract of Dr. Diss. Novosibirsk, 1997.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ююкин Игорь Викторович — кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuyukin, Igor V. — PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2020 г.
Received: February 4, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-272-278

DETERMINATION OF A FINITE NUMBER OF SHIPS WITH THE NAVIGATION MESSAGES MUTUAL EXCHANGE VIA SHIPBOARD EQUIPMENT OF THE AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEM

Y. M. Ustinov, A. N. Marinich, A. P. Gorobtsov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

In accordance with SOLAS 74 Regulation 5.19 all seagoing ships with a gross tonnage of over 300 gt are required to be equipped with ship's equipment of the automatic identification system (AIS) that is to improve Maritime Safety. It provides mutual exchange with the navigation and safety messages between the ships.

Mutual messaging is possible due to applying the schemes, proposed in the automatic identification system, of multi-station access and accurate synchronization of ships own time scales aligned with the signals of the Global Navigation Satellite System. The multi-station access performance is evaluated by the number of ships with ability of mutual exchange. However, any scheme has a finite capacity. The purpose of this paper is the calculation of the performance of the schemas used in the basic (stand-alone) operation of shipboard equipment for automatic identification system.

The scheme performance depends on the ship's traffic mode. It has been shown that the technical parameters of the automatic identification system shipboard equipment and algorithms for multi-station access allow up to 100 vessels to be involved into exchange with navigation messages within the area of the vessel traffic management system.

In the high seas when ships generally do not maneuver extensively when moving, the performance of multi-station access decreases less than 50 ships. There is a possibility to increase the AIS effectiveness by using three and more carrier frequencies to transmit ship's data.

Keywords: Automatic identification system, multi-station access, navigation message, signal frame, slot length, autonomous, assigned and inquired modes, performance of multi-station access.

For citation:

Ustinov, Yury M., Aleksandr N. Marinich, and Alexander P. Gorobtsov. "Determination of a finite number of ships with the navigation messages mutual exchange via shipboard equipment of the automatic identification system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 272–278. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-272-278.

УДК 621.396

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО ЧИСЛУ СУДОВ С ВЗАИМНЫМ ОБМЕНОМ НАВИГАЦИОННЫМИ СООБЩЕНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ СУДОВОЙ АППАРАТУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Ю. М. Устинов, А. Н. Маринич, А. П. Горобцов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В соответствии с правилом 19 гл. V «Безопасность мореплавания» Международной конвенции СОЛАС-74 все морские суда валовой вместимостью более 300 должны быть оснащены судовой аппаратурой автоматической идентификационной системы, обеспечивающей взаимный обмен между судами навигационными сообщениями и сообщениями безопасности. Известно, что в навигационных сообщениях содержатся статические, динамические и рейсовые данные судна, в сообщениях безопасности передаются данные о навигационной и метеорологической обстановке. Взаимный обмен сообщениями возможен благодаря предложенным в автоматической идентификационной системе схемам многостанционного доступа и точной синхронизации собственных шкал времени судов по сигналам глобальной навигационной

спутниковой системы. Производительность многостанционного доступа оценивается числом судов с взаимным обменом. Однако любая схема имеет конечную производительность. В статье выполнен расчет производительности используемых схем в основном (автономном) режиме работы судовой аппаратуры автоматической идентификационной системы. Производительность схемы зависит от режима движения судов. Показано, что технические характеристики судовой аппаратуры автоматической идентификационной системы и алгоритмы многостанционного доступа позволяют производить обмен навигационными сообщениями до ста судов в районе действия системы управления движением судов. Ограничения определяют возможности использования АИС в различных морских районах. В открытом море, когда суда не осуществляют маневры при движении, производительность многостанционного доступа меньше и составляет пятьдесят судов. Технически существует возможность увеличить производительность схем доступа, используя не две, а три и более несущие частоты для передачи судовых данных.

Ключевые слова: автоматическая идентификационная система, многостанционный доступ, навигационное сообщение, кадр сигнала, длина слота, автономный, назначенный и запросный режимы работы, производительность многостанционного доступа.

Для цитирования:

Устинов Ю. М. Определение ограничений по числу судов с взаимным обменом навигационными сообщениями с помощью судовой аппаратуры автоматической идентификационной системы / Ю. М. Устинов, А. Н. Маринич, А. П. Горобцов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 272–278. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-272-278.

Введение (Introduction)

Суда валовой вместимостью более 300, оснащенные автоматической идентификационной системой (АИС), на удалении до 18 морских миль (устойчивая дальность сигнала в диапазоне очень высоких частот) обеспечиваются взаимным обменом навигационными сообщениями для повышения безопасности плавания в автономном, назначенном и запросном режимах работы АИС [1]–[4]. Взаимный обмен сообщениями многих судов (многостанционный доступ) в АИС класса А возможен благодаря временному разделению каналов (TDMA) на двух независимых несущих частотах и временной синхронизации кадров на разных судах по сигналам Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) или дифференциального режима ГНСС (ДГНСС). Навигационные сообщения содержат статические, динамические и рейсовые данные, а также сообщения по безопасности.

К *статическим данным* относятся:

- опознаватель морской подвижной службы MMSI;
- номер ИМО судна;
- позывной судна;
- название судна;
- длина и ширина судна;
- тип судна;
- место расположения антенны ГНСС / ДГНСС.

К *динамическим данным* относятся:

- координаты судна (в системе координат WGS–84);
- время (в системе UTC);
- истинный курс судна;
- путевой угол судна;
- навигационный статус судна;
- скорость судна относительно грунта;
- направление и скорость поворота судна.

К *рейсовым данным* относятся:

- осадка судна;
- вид груза;
- порт назначения;

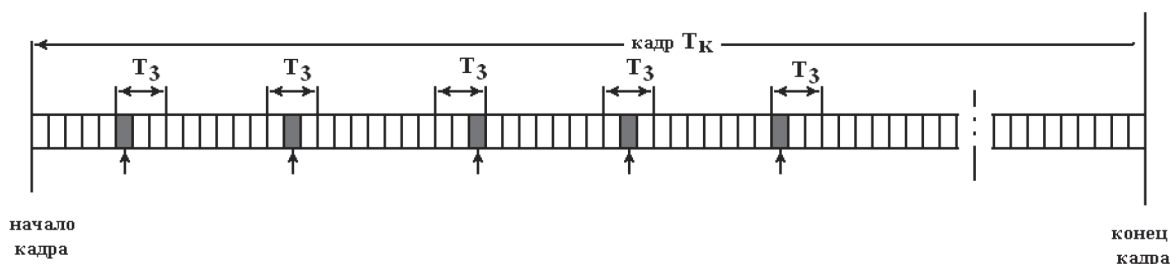
- время прибытия;
- контрольные точки маршрута;
- план перехода;
- число людей на борту.

Судовые данные формируют базы данных центров служб управления движением судов (СУДС) и автоматизированных систем мониторинга и служат основным источником информации для принятия решений службами управления, а также спасательно-координационными центрами. Сообщения безопасности содержат данные о навигационной и метеорологической обстановке в определенном районе. Кадр АИС-сигнала на каждой частоте имеет длину $T_k = 60$ с и разделяется на 2250 слотов (временных окон). Длительность слота равна 26,67 мс. Навигационные сообщения передаются со скоростью 9600 бит/с. В автономном режиме работы судовой аппаратуры АИС длительность сообщения не превышает длительности слота. Таким образом, можно сделать вывод о том, что за период времени, равный 60 с, на двух несущих частотах производительность многостанционного доступа составляет 4500 судов, находящихся на удалении до 18 миль. Далее показано, что с учетом технических характеристик АИС-аппаратуры многостанционный доступ за период времени, равный 60 с, в районе интенсивного судоходства намного меньше. Реальное количество судов можно определить по числу занятых слотов в одном кадре АИС-сигнала [5], [6].

Если одно судно при многостанционном доступе в среднем занимает $N_{сл}$ слотов, то за время одного кадра возможен на одной частоте обмен сообщениями $n_1 = \frac{2250}{N_{сл}}$ судов, а на двух частотах — $n_2 = \frac{4500}{N_{сл}}$ судов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим среднее число занятых слотов одним судном в кадре сигнала. В автономном (основном) режиме работы АИС-аппаратуры применяется самоорганизующаяся схема многостанционного доступа SOTDMA (Self Organizing TDMA). По этой схеме для борьбы с синхронными помехами при передаче каждого следующего сообщения рабочий слот выбирается случайным образом среди трех свободных от передачи кандидатных слотов N_k . На рисунке в кадре T_k стрелками отмечены рабочие слоты, которые затемнены, T_3 — интервал времени, занятый тремя слотами.



Случайный выбор слота для передачи сообщения
из трех свободных слотов по схеме доступа SOTDMA

В таблице приведены значения интервалов передачи T_n [7] в различных режимах движения судна. Вероятность заданного режима движения судна обозначена $P_{дв}$:

Режим движения	Интервал передачи T_n
Судно на якорю или имеет ход не более 3 уз	3 мин
Судно на якорю или имеет ход более 3 уз	10 с
Судно имеет ход 0–14 уз без изменения курса	10 с
Судно имеет ход 0–14 уз с изменением курса	3 1/3 с
Судно имеет ход 14–23 уз	6 с
Судно имеет ход 14–23 уз с изменением курса	2 с
Судно имеет ход более 23 уз	2 с
Судно имеет ход более 23 уз с изменением курса	2 с

Среднее число занятых слотов $N_{\text{сл}}$ в одном кадре сигнала T_k одним судном при N_k свободных от передачи кандидатных слотов при режиме движения судна с вероятностью $P_{\text{дв}}$ и интервалами передачи навигационных сообщений $T_{\text{п}}$ определится выражением [7]:

$$N_{\text{сл}} = \frac{T_k N_k}{T_k} P_{\text{дв}}. \quad (1)$$

Из таблицы (после объединения ряда режимов) следует, что любое судно может находиться в одном из пяти режимов движения с вероятностями $P_{\text{дв}1-5}$, при которых интервалы передачи сообщений $T_{\text{п}1-5} = 2; 3,3; 6; 10; 180$ с. Очевидно, что выполняется условие

$$P_{\text{дв}1} + P_{\text{дв}2} + P_{\text{дв}3} + P_{\text{дв}4} + P_{\text{дв}5} = 1. \quad (2)$$

Окончательное выражение для среднего числа занятых слотов при пяти возможных режимах движения судна с учетом выражений (1) и (2) будет иметь вид

$$\begin{aligned} N_{\text{сл}} &= \frac{60 \cdot 3}{2} P_{\text{дв}1} + \frac{60 \cdot 3}{3,3} P_{\text{дв}2} + \frac{60 \cdot 3}{6} P_{\text{дв}3} + \frac{60 \cdot 3}{10} P_{\text{дв}4} + \frac{60 \cdot 3}{180} P_{\text{дв}5} = \\ &= 90 P_{\text{дв}1} + 54,5 P_{\text{дв}2} + 30 P_{\text{дв}3} + 18 P_{\text{дв}4} + P_{\text{дв}5}. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты (Results)

Среднее число судов с взаимным обменом навигационными сообщениями с учетом возможной работы АИС-аппаратуры ограничено пропускной способностью системы не только в автономном, но и в назначенном и запросном режимах. По решению центра СУДС по команде базовой станции АИС не более двух судовых аппаратур АИС могут быть переведены из автономного в назначенный режим работы [8]. Время работы в назначенном режиме не более 8 мин в номерах слотов, определенных базовой станцией АИС. В назначенном режиме навигационные сообщения передаются с интервалом 1 с. В запросном режиме АИС судовая аппаратура передает сообщение по запросу АИС базовой станции, а также сама может запрашивать сообщения:

- для синхронизации собственной шкалы времени;
- для использования дифференциальных поправок ГНСС;
- учета особенностей работы базовой станции АИС данным режиме и др.; запрошенное сообщение излучается с частотой один раз за 4 с.

Определим ограничения по среднему числу судов в районе действия СУДС, для которых обеспечивается взаимный обмен навигационными сообщениями сигналами АИС. Расчет выполнен при условии равенства вероятностей видов движения судов:

$$P_{\text{дв}1} = P_{\text{дв}2} = P_{\text{дв}3} = P_{\text{дв}4} = P_{\text{дв}5} = 0,2. \quad (4)$$

Результаты расчета:

- среднее число занятых слотов одним судном с учетом выражения (3) составит

$$N_{\text{сл}} = 90 \cdot 0,2 + 54,4 \cdot 0,2 + 30 \cdot 0,2 + 18 \cdot 0,2 + 0,2 = 44,08; \quad (5)$$

- среднее число судов при работе АИС — судовой аппаратуры на одной частоте

$$n_1 = \frac{2250}{44} \approx 51; \quad (6)$$

- при работе на двух частотах —

$$n_2 = \frac{4500}{44} \approx 102. \quad (7)$$

Количество судов с взаимным обменом навигационными сообщениями при переводе ряда АИС судовой аппаратуры в назначенный или запросный режимы не меняется.

Обсуждение (Discussion)

Ограниченное число судов с взаимным обменом навигационными сообщениями наблюдается также в районе действия СУДС, что напрямую связано с обеспечением безопасности мореплавания. В регионах интенсивного судоходства (например, в проливе Ла-Манш, Финском заливе, заливе Петра Великого, Азовском море, районах действия СУДС и др.) эти требования к безопасности мореплавания возрастают [8]–[11].

Производительность схемы падает, если суда часто осуществляют маневры курсом и / или скоростью хода. В открытом море, когда суда в большинстве случаев следуют со скоростью 14–23 уз без изменения курса, производительность схем многостанционного доступа ниже, чем в прибрежных районах действия СУДС, что указывает на ограничение АИС по числу одновременно обслуживаемых судов.

Для открытого моря параметры: $T_{\text{п}} = 2$ с; $P_{\text{дв}} = 1$.

Получим $N_{\text{сл}} = \frac{60 \cdot 3}{2} = 90$; $n_1 = \frac{2250}{90} = 25$ судов; $n_2 = \frac{4500}{90} = 50$ судов.

Выводы (Conclusions)

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Из приведенных выражений следует, что производительность многостанционных схем доступа в виде числа судов с взаимным обменом сообщениями зависит от вероятности, с которой суда находятся в тех или иных режимах движения. Наличие судов, стоящих в порту, в пределах дальности действия данной системы способствует значительному повышению производительности канала.
2. Технически существует возможность увеличить производительность схем доступа, используя три и более несущие частоты для передачи судовых данных. Другим направлением развития АИС является использование искусственных спутников Земли для ретрансляции сигнала [12], [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резолюция MSC.74(69). Приложение 3. «Рекомендации по эксплуатационным требованиям к универсальной судовой АИС» // Сборник № 10 резолюций ИМО. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 1998. — С. 42–54.
2. Гайдук Е. Л. Автоматическая система обмена данными: новые технологии для e-Навигации / Е. Л. Гайдук // Морской вестник. — 2017. — № 2 (62). — С. 91–96.
3. Стандарт МЭК 61993-2:2001(Е). Ч. 2: Судовое оборудование универсальной автоматической идентификационной системы (АИС) класса А. Технические и эксплуатационные требования, методы и требуемые результаты испытаний. — Женева, Швейцария: изд. МЭК, 2001. — 119 с.
4. Маринич А. Н. Судовая автоматическая идентификационная система / А. Н. Маринич [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Судостроение, 2004. — 179 с.
5. Рекомендации МСЭ-Р М.1371-1. Технические характеристики универсальной судовой автоматической идентификационной системы (АИС), использующей множественный доступ с временным разделением в УКВ полосе частот морской подвижной службы. [Электронная публикация]. — Женева, Швейцария: изд. МСЭ, 2002. — 144 с.
6. Устинов Ю. М. Методы частотной модуляции с минимальным сдвигом и непрерывной фазой при передаче сообщений в автоматической информационной системе (АИС) с помощью двоичных кодовых последовательностей / Ю. М. Устинов, А. Р. Шигабутдинов // Навигация и гидрография. — 2002. — № 14. — С. 22–28.
7. Устинов Ю. М. Технические средства судовождения / Ю. М. Устинов [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Морсар, 2016. — Т. 3: Судовые приборы электронной навигации. — 470 с.
8. Базаров Ю. И. Новая морская цифровая связь для e-Навигации / Ю. И. Базаров, М. И. Исмагилов, А. Н. Рогов // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 3 (76). — С. 48–54.
9. Tu E. Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: a comprehensive survey from data to methodology / E. Tu, G. Zhang, L. Rachmawati, E. Rajabally, G. B. Huang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2017. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 1559–1582. DOI: 10.1109/TITS.2017.2724551.
10. Liu L. Coverage effectiveness analysis of AIS base station: a case study in Yangtze River / L. Liu, X. Liu, X. Chu, J. Li, Z. Jiang, W. He // 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). — IEEE, 2017. — Pp. 178–183. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047763.

11. Svanberg M. AIS in maritime research / M. Svanberg, V. Santén, A. Hörteborn, H. Holm, C. Finnsgård // *Marine Policy*. — 2019. — Vol. 106. — Pp. 103520. DOI: 10.1016/j.marpol.2019.103520.

12. Alincourt E. Methodology for AIS signature identification through magnitude and temporal characterization / E. Alincourt, C. Ray, P. Ricordel, D. Dare-Emzivat, A. Boudraa // *OCEANS 2016 – Shanghai*. — IEEE, 2016. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485420.

13. Harchowdhury A. Generalized Mechanism of SOTDMA and Probability of Reception for Satellite-based AIS / A. Harchowdhury, B. K. Sarkar, K. Bandyopadhyay, A. Bhattacharya // *2012 5th International Conference on Computers and Devices for Communication (CODEC)*. — IEEE, 2012. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/CODEC.2012.6509332.

REFERENCES

1. “MSC.74(69) Resolution. Addendum 3 “Recommendation on operational requirements to Universal Shipborne AIS.” *Collection № 10 of IMO Resolutions*. SPb.: ZAO “CNIIMF”, 1998. 42–54.

2. Gaiduk, E.L. “Avtomaticeskaya sistema obmena dannymi: novye tekhnologii dlya e-Navigatsii.” *Morskoi vestnik* 2(62) (2017): 91–96.

3. IEC International Standard 61993-2:2001(E). *Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Automatic identification systems (AIS) – Part 2: Class A shipborne equipment of the universal automatic identification system (AIS) – Operational and performance requirements, methods of test and required test results*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2001.

4. Marinich, A. N., I. G. Protsenko, V. Yu. Reznikov, Yu. M. Ustinov, R. N. Chernyaev, and A. R. Shigabutdinov. *Sudovaya avtomaticheskaya identifikatsionnaya sistema*. Edited by Yu. M. Ustinov. SPb.: Sudostroenie, 2004.

5. Recommendations ITU-R M.1371-1. *Technical characteristics for a universal shipborne automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band*. ITU, 2002.

6. Ustinov, Yu. M., and A. R. Shigabutdinov. “Metody chastotnoi modulyatsii s minimal’nym sdvigom i nepreryvnoi fazoi pri peredache soobshchenii v avtomaticheskoi informatsionnoi sisteme (AIS) s pomoshch’yu dvoichnykh kodovykh posledovatel’nostei.” *Navigatsiya i gidrografiya* 14 (2002): 22–28.

7. Gorobtsov, A. P., A. N. Marinich, A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. *Tekhnicheskie sredstva sudovozhdeniya*. Vol. 3. *Sudovye pribory elektronnoi navigatsii*. Edited by Yu. M. Ustinov. SPb.: Morsar, 2016.

8. Bazarov, Yu. I., M. I. Ismagilov, and A. N. Rogov. “Novaya morskaya tsifrovaya svyaz’ dlya e-Navigatsii.” *Transport Rossiiskoi Federatsii* 3(76) (2018): 48–54.

9. Tu, Enmei, G. Zhang, L. Rachmawati, E. Rajabally, and G. B. Huang. “Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: a comprehensive survey from data to methodology.” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19.5 (2017): 1559–1582.

10. Liu, Lei, X. Liu, X. Chu, J. Li, Z. Jiang, and W. He. “Coverage effectiveness analysis of AIS base station: a case study in Yangtze River.” *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047763.

11. Svanberg, Martin, Vendela Santén, Axel Hörteborn, Henrik Holm, and Christian Finnsgård. “AIS in maritime research.” *Marine Policy* 106 (2019): 103520. DOI: 10.1016/j.marpol.2019.103520.

12. Alincourt, Erwan, Cyril Ray, Pierre-Michel Ricordel, Delphine Dare-Emzivat, and Abdel Boudraa. “Methodology for AIS signature identification through magnitude and temporal characterization.” *OCEANS 2016-Shanghai*. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485420.

13. Harchowdhury, Anindya, Binay Kumar Sarkar, Kalyan Bandyopadhyay, and Amitabha Bhattacharya. “Generalized Mechanism of SOTDMA and Probability of Reception for Satellite-based AIS.” *2012 5th International Conference on Computers and Devices for Communication (CODEC)*. IEEE, 2012. DOI: 10.1109/CODEC.2012.6509332.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Устинов Юрий Матвеевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ustinov, Yury M. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

Маринич Александр Николаевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: marinichan@gumrf.ru

Горобцов Александр Петрович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: gorobtsovap@gumrf.ru

Marinich, Aleksandr N. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: marinichan@gumrf.ru

Gorobtsov, Alexander P. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gorobtsovap@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 10 января 2020 г.

Received: January 10, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-279-288

DESCRIPTION OF THE ROGUE-WAVES MOTION BASED ON 3D NAVIER-STOKES EQUATIONS

A. V. Koptev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The investigation of rogue-waves which is insufficiently studied for today and present dangerous phenomena for mariners is proposed in the paper. An analytical study of the generation and propagation of such waves based on equations of classical fluid mechanics is presented. The 3D Navier – Stokes equations for the unsteady motion of a viscous incompressible fluid with small Reynolds number are proposed as the original relations. The main unknowns are three components of the velocity vector and pressure. The motion in deep water when the influence of the free surface and boundary conditions can be neglected is considered. The analytical solution method proposed by the author based on the first integral of these equations and the generator of solution built on its basis, is used. It has been shown that within the framework of the assumptions under consideration there are exact solutions of the Navier – Stokes equations which describe deep vortex motion with unlimitedly increasing in time of pressure and velocities. From the theoretical point of view some motions of that type can generate the rogue-waves. To find solutions of that type it is necessary to solve three ordinary differential equations of the first order and to solve a system of nonlinear algebraic equations of the fourth order. Two solutions constructed in this way are considered in the paper and their main properties are analyzed. It has been shown that as a result of this type of motion and under certain initial conditions the rogue-waves most likely occur. In this case the properties of viscosity and the three-dimensional nature of the motion are decisive. The approximate estimates for the area where waves reach the free surface and ratio that determines the wave profile are obtained.

Keywords: ship, rogue- wave, viscous incompressible fluid, unsteady motion, Navier – Stokes equation, integral, direction vector, increase decrement, pressure, free surface, wave profile.

For citation:

Koptev, Alexandr V. "Description of the rogue-waves motion based on 3D Navier-Stokes equations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 279–288. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-279-288.

УДК 532.5.032:532.592

ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЛН-УБИЙЦ НА ОСНОВЕ 3D УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ – СТОКСА

А. В. Коптев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе предложено исследование волн-убийц — одного из мало изученных и опасных явлений, с которым встречаются мореплаватели. Представлено аналитическое исследование зарождения и распространения таких волн на основе классических уравнений гидромеханики. В качестве исходных соотношений предлагаются 3D уравнения Навье – Стокса для неустановившегося движения вязкой несжимаемой жидкости при небольших по величине числах Рейнольдса. Основными неизвестными являются три компонента вектора скорости и давление. Предлагается рассмотрение движения в глубокой воде, когда влиянием свободной поверхности и граничных условий можно пренебречь. Для решения исходных уравнений используется предложенная автором методика решения уравнений Навье – Стокса, основанная на первом интеграле этих уравнений и построенном на его основе генераторе решений. Показано, что в рамках рассматриваемых предположений существуют точные решения уравнений Навье – Стокса, описывающие глубинные вихревые движения с неограниченно возрастающим во времени давлением и скоростями. Некоторые из таких движений теоретически могут порождать волны-убийцы. В этом случае необходимо решить три обыкновенных дифференциальных уравнения первого порядка и систему нелинейных

алгебраических уравнений четвертого порядка. Рассмотрены два построенных таким образом решения, проанализированы их основные свойства и произведено сравнение гидромеханических характеристик. Показано, что при движениях такого типа при определенных начальных условиях наиболее вероятно возникновение волн-убийц. При этом отмечается, что определяющими являются свойства вязкости среды и трехмерный характер движения. Получены приближенные оценки для области выхода волны на поверхность и выражение для определения профиля волны.

Ключевые слова: судно, волна-убийца, вязкая несжимаемая жидкость, неустановившееся движение, уравнение Навье – Стокса, интеграл, направляющий вектор, декремент возрастания, давление, свободная поверхность, профиль волны.

Для цитирования:

Коптев А. В. Описание движения волн-убийц на основе 3D уравнений Навье – Стокса / А. В. Коптев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 279–288. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-279-288.

Введение (Introduction)

Волны-убийцы (Rogue-Waves or Monster-Waves) — одно из наиболее опасных явлений, с которыми встречаются мореплаватели. Такие волны представляют большую опасность для всех видов судов, от небольших яхт до контейнеровозов и супертанкеров. Волны-убийцы, которые могут достигать до 30 м высотой, обладают огромной разрушительной силой и нередко приводят к катастрофам [1]–[4]. Часто волны-убийцы возникают совершенно неожиданно, без каких бы то ни было предшествующих изменений погодных условий и штормовой обстановки. По свидетельству очевидцев, такие волны нередко возникают как бы ниоткуда, обрушивая свою разрушительную силу на проходящие мимо суда.

Всестороннее изучение природы таких волн является одной из важных и актуальных проблем. Важно понять причины образования таких волн, дать прогноз времени и места возникновения, смоделировать параметры и степень воздействия на судно. Следует выделить три основных аспекта изучения проблемы. Первый — это этап зарождения. На этом этапе важно выявить причины, условия и теоретически объяснить механизм образования таких волн. Второй — этап эволюции или движения волны. На данном этапе важно оценить, в каком направлении движется волна и как изменяются во времени и пространстве ее параметры. Целью третьего этапа является прогнозирование возможных ее воздействий на судно. При этом необходимо оценить выходные параметры волны и спрогнозировать место появления, степень повреждений и последствия.

В настоящее время третий этап имеет эмоционально-описательный характер [3], [4] тогда как первые два этапа рассматривались разными авторами, использующими различные подходы. В работах [5], [6] зарождение и эволюция волн-убийц рассматривались на основе уравнений движения идеальной жидкости. Тем самым предполагалось, что эффекты вязкого трения никакой роли в образовании таких волн не играют. В работах [7], [8] рассмотрение основано на уравнениях типа Кортервега-де-Фриза. Тем самым предполагалось, что механизм образования волн-убийц аналогичен механизму образования так называемых *удиненных поверхностных волн*, или *солитонов*. При этом не рассматривалась фаза движения на глубине, предшествующая выходу волны на поверхность и неразрывно связанная с фазой поверхностного движения. В работах [9], [10] предлагалось численное моделирование воздействия 2D профиль судна на основе одной из моделей турбулентности, однако движение волны на глубине не рассматривалось. В работе [11] выполнено исследование высоких поверхностных волн на основе моделирования и лабораторного эксперимента, а также без рассмотрения фазы глубинного движения. Расчет области выхода волны на поверхность в указанных ранее работах не выполнялся, и формирование начального профиля волны не рассматривалось. Исследования, выполненные в указанных ранее работах, не дают ответа на многие конкретные вопросы. В частности, пока нет ответа на вопрос, каким образом движение аккумулируют в себе огромную энергию, так же, как и нет ответа на вопрос, почему наряду с волной в виде гребня может возникать волна в виде впадины, причем тоже огромных размеров. Недостатком является также неполный учет трехмерного характера движения, свойств вязкости окружающей жидкой среды и эволюции таких

волн на глубине. Все это заставляет вновь обращаться к проблеме и искать ответы на поставленные вопросы, используя для исследования новые модели.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Выполнено аналитическое исследование проблемы на основе классических уравнений гидромеханики. За основу предлагается взять 3D уравнения Навье – Стокса для неустановившегося движения вязкой несжимаемой жидкости [12], [13]. При сравнительно небольших значениях числа Рейнольдса эти уравнения адекватно описывают 3D движение жидкой среды при строгом учете эффектов вязкого трения. В безразмерных переменных (при $\rho = 1$) они имеют следующий вид:

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

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

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

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

Независимыми переменными в уравнениях (1)–(4) являются пространственные координаты x, y, z и время t . Роль основных неизвестных играют три компонента вектора скорости: u, v, w и давление p . Каждая из этих величин есть некоторая функция четырех переменных: x, y, z, t . Величина Φ представляет заданную функцию потенциала внешних сил, Re обозначает неотрицательный параметр, называемый *числом Рейнольдса*:

$$\text{Re} = \frac{U_0 L_0}{\nu}. \quad (5)$$

Здесь U_0 и L_0 — масштабы скорости и длины соответственно; ν — коэффициент кинематической вязкости.

Основная задача состоит в решении уравнений (1)–(4) и определении основных неизвестных u, v, w, p как функций координат и времени. Для рассматриваемого случая внешней силой является сила тяжести. Направим ось OZ вертикально вверх, полагая на свободной поверхности $z = 0$. Тогда потенциал внешней силы определяется выражением $\Phi = -gz$, где g — безразмерное ускорение свободного падения.

В целях упрощения дальнейшего исследования предлагается использовать не уравнения (1)–(4) непосредственно, а первый интеграл этих уравнений, ранее полученный в работах [14]–[16]. Для общего случая 3D неустановившегося движения вязкой несжимаемой среды в безразмерных переменных интеграл задается следующими девятью взаимосвязанными соотношениями:

$$p - p_0 + \Phi + \frac{U^2}{2} + d + d_t = \alpha_4 + \beta_4 + \gamma_4; \quad (6)$$

$$u^2 - v^2 + \frac{2}{\text{Re}} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \Psi_{10}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \Psi_{10}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi_{11}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Psi_{12}}{\partial z^2} + \\ + \frac{\partial^2 \Psi_{15}}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 \Psi_{14}}{\partial x \partial z} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \Psi_3}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} + \frac{\partial(\Psi_5 + \Psi_6)}{\partial z} \right] + 3(\alpha_4 - \beta_4); \quad (7)$$

$$v^2 - w^2 + \frac{2}{\text{Re}} \left(\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \Psi_{10}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_{11}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi_{12}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_{12}}{\partial z^2} - \\ - \frac{\partial^2 \Psi_{13}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \Psi_{14}}{\partial x \partial z} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial(\Psi_1 + \Psi_2)}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_4}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_6}{\partial z} \right] + 3(\beta_4 - \gamma_4); \quad (8)$$

$$uv - \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial^2 \Psi_{10}}{\partial x \partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Psi_{14}}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 \Psi_{15}}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \Psi_{13}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \Psi_3}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} + \frac{\partial (\Psi_8 + \Psi_9)}{\partial z} \right] + \frac{1}{2} (\alpha'_{1z} - \alpha'_{3t} + \beta'_{1z} - \beta'_{2t}); \quad (9)$$

$$uw - \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 \Psi_{11}}{\partial x \partial z} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Psi_{15}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \Psi_{14}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_{13}}{\partial y \partial z} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \Psi_5}{\partial x} - \frac{\partial (\Psi_9 - \Psi_7)}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_2}{\partial z} \right] + \frac{1}{2} (-\alpha'_{1y} - \alpha'_{2t} + \gamma'_{1y} - \gamma'_{3t}); \quad (10)$$

$$vw - \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial^2 \Psi_{12}}{\partial y \partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Psi_{14}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \Psi_{15}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi_{13}}{\partial x \partial z} \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial (\Psi_7 + \Psi_8)}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_6}{\partial y} + \frac{\partial \Psi_4}{\partial z} \right] - \frac{1}{2} (\beta'_{1x} + \beta'_{3t} + \gamma'_{1x} + \gamma'_{2t}); \quad (11)$$

$$u = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_3}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_7}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Psi_8}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_5}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_2}{\partial z} \right) \right] + \frac{1}{2} (\alpha'_{2z} + \alpha'_{3y} + \delta'_{1y} + \delta'_{2z}); \quad (12)$$

$$v = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Psi_3}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_7}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Psi_9}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_6}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_4}{\partial z} \right) \right] + \frac{1}{2} (\beta'_{2x} + \beta'_{3z} - \delta'_{1x} + \delta'_{3z}); \quad (13)$$

$$w = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Psi_5}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_8}{\partial y} + \frac{\partial \Psi_2}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Psi_9}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_6}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_4}{\partial z} \right) \right] + \frac{1}{2} (\gamma'_{2y} + \gamma'_{3x} - \delta'_{2x} - \delta'_{3y}). \quad (14)$$

Уравнения (6)–(14) связывают основные неизвестные: u, v, w, p , ассоциированные неизвестные Ψ_i , возникающие при интегрировании, и произвольные функции переменных $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j$. Для функций $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j$ выполняются равенства:

$$\frac{\partial \alpha_j}{\partial x} = \frac{\partial \beta_j}{\partial y} = \frac{\partial \gamma_j}{\partial z} = \frac{\partial \delta_j}{\partial t} = 0.$$

Кроме указанных величин в соотношении (6) присутствуют также p_0, U, d, d_t . Первая из указанных величин представляет аддитивную постоянную давления, другие — определены равенствами:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}; \quad d_t = -\frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial (\Psi_2 - \Psi_1)}{\partial x} + \frac{\partial (\Psi_4 - \Psi_3)}{\partial y} + \frac{\partial (\Psi_6 - \Psi_5)}{\partial z} \right); \quad (15)$$

$$d = -\frac{U^2}{6} - \frac{1}{3} \left(\Delta_{xy} \Psi_{10} - \Delta_{xz} \Psi_{11} + \Delta_{yz} \Psi_{12} + \frac{\partial^2 \Psi_{13}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \Psi_{14}}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \Psi_{15}}{\partial y \partial z} \right). \quad (16)$$

Символами $\Delta_{xy}, \Delta_{xz}, \Delta_{yz}$ в равенстве (16) обозначены неполные операторы Лапласа по координатам:

$$\Delta_{xy} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}; \quad \Delta_{xz} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; \quad \Delta_{yz} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Следует обратить внимание на характерные особенности уравнений (6)–(14). Порядок производных относительно основных неизвестных u, v, w, p в этих уравнениях на единицу меньше их порядка в исходных уравнениях (1)–(4). Налицо наглядное подтверждение свойства интеграла любых дифференциальных уравнений: соотношения, представляющие интеграл, имеют меньший порядок, чем исходные уравнения. Необходимо обратить внимание также на следующий факт. Нелинейные члены в соотношениях (7)–(11) представлены путем квадратичных комбинаций скоростей. С учетом того, что в этих уравнениях присутствуют первые производные u, v, w и некоторые свободные члены, можно справедливо заключить, что каждое из приведенных

соотношений представляет уравнение известного типа, а именно 2D уравнение Риккати. В математическом плане уравнения (6)–(14) являются более простыми, чем исходные уравнения Навье – Стокса (1)–(4). Поэтому дальнейшее рассмотрение предлагается осуществлять на основе уравнений (6)–(14).

Результаты (Results)

Интеграл уравнений Навье – Стокса в виде соотношений (6)–(14) дает возможность построить генератор решений. Описание этой процедуры представлено в работах [15], [16]. С помощью данной методики представляется возможным строить новые решения уравнений Навье – Стокса, причем можно строить решения, обладающие самыми различными свойствами [17], [18]. Среди множества полученных таким образом решений выделим те, которые описывают движение, характерное для волн-убийц.

Рассмотрим уравнения (6) и (12)–(14), определяющие общую структуру решений [19]. В частности, соотношения (12)–(14) позволяют построить решения, для которых выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \Psi_3}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} + \frac{\partial \Psi_7}{\partial z} &= A(t)e^{n_1x+m_1y+l_1z}; & -\frac{\partial \Psi_5}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_8}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_2}{\partial z} &= B(t)e^{n_2x+m_2y+l_2z}; \\ \frac{\partial \Psi_9}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_6}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_4}{\partial z} &= C(t)e^{n_3x+m_3y+l_3z}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ — некоторые функции времени; n_k , m_k , l_k , при $k = 1, 2, 3$ — некоторые вещественные числа, представляющие координаты волновых векторов.

В этом случае неизвестные u , v , w определяются выражениями:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2}(A(t)m_1e^{n_1x+m_1y+l_1z} + B(t)l_2e^{n_2x+m_2y+l_2z}); & v &= \frac{1}{2}(-A(t)n_1e^{n_1x+m_1y+l_1z} + C(t)l_3e^{n_3x+m_3y+l_3z}); \\ w &= -\frac{1}{2}(B(t)n_2e^{n_2x+m_2y+l_2z} + C(t)m_3e^{n_3x+m_3y+l_3z}). \end{aligned} \quad (18)$$

Данные выражения удовлетворяют уравнению неразрывности (4) и уравнениям (12)–(14). Осталось определить функции $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ и значения $\{n_k, m_k, l_k\}$ так, чтобы были удовлетворены остальные соотношения (6)–(11). Предположения (17) вносят существенные ограничения в указанные величины. В частности, функции времени $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ должны удовлетворять следующим трем обыкновенным дифференциальным уравнениям [14]:

$$\dot{A} - A \frac{(n_1^2 + m_1^2 + l_1^2)}{\text{Re}} = 0; \quad \dot{B} - B \frac{(n_2^2 + m_2^2 + l_2^2)}{\text{Re}} = 0; \quad \dot{C} - C \frac{(n_3^2 + m_3^2 + l_3^2)}{\text{Re}} = 0.$$

Решения этих уравнений определяются в виде

$$A(t) = A_0 e^{\frac{(n_1^2 + m_1^2 + l_1^2)t}{\text{Re}}}; \quad B(t) = B_0 e^{\frac{(n_2^2 + m_2^2 + l_2^2)t}{\text{Re}}}; \quad C(t) = C_0 e^{\frac{(n_3^2 + m_3^2 + l_3^2)t}{\text{Re}}}, \quad (19)$$

где A_0 , B_0 , C_0 — начальные значения функций $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ при $t = 0$.

При этом выполнены следующие условия:

$$A(0) = A_0; \quad B(0) = B_0; \quad C(0) = C_0. \quad (20)$$

В дальнейшем будем полагать A_0 , B_0 , C_0 вещественными числами, заданными изначально. Что касается значений n_k , m_k , l_k , то они должны удовлетворять системе шести алгебраических уравнений. Для определения трех упорядоченных троек чисел (n_k, m_k, l_k) имеем алгебраическую задачу — нужно разрешить систему шести нелинейных алгебраических уравнений относительно девяти неизвестных [16]. Каждое решение системы приводит к точному решению уравнений Навье – Стокса (1)–(4). Предлагается рассмотреть два полученных таким образом решения. В целях удобства дальнейшего аналитического рассмотрения остановимся на новых решениях, которые соответствуют целочисленным значениям n_k , m_k , l_k .

Решение 1. Для первого решения волновые вектора представляются следующими тройками чисел:

$$(1, -2, -1); (-1, -1, -2); (1, 1, 2). \quad (21)$$

Для этого случая соответствующее решение уравнений Навье – Стокса определяется выражениями:

$$\begin{aligned} u &= -e^{\frac{6t}{\text{Re}}} (A_0 e^{x-2y-z} + B_0 e^{-x-y-2z}); \quad v = \frac{1}{2} e^{\frac{6t}{\text{Re}}} (-A_0 e^{x-2y-z} + 2C_0 e^{x+y+2z}); \\ w &= \frac{1}{2} e^{\frac{6t}{\text{Re}}} (B_0 e^{-x-y-2z} - C_0 e^{x+y+2z}); \quad p - p_0 = gz + e^{\frac{12t}{\text{Re}}} \left(\frac{1}{4} A_0 B_0 e^{-3y-3z} - \frac{3}{4} A_0 C_0 e^{2x-y+z} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Решение 2. Для второго решения волновые вектора представляются в виде:

$$(1, -2, -4); (-1, -4, -2); (1, 4, 2). \quad (23)$$

В этом случае решение уравнений Навье – Стокса определяется в виде:

$$\begin{aligned} u &= -e^{\frac{21t}{\text{Re}}} (A_0 e^{x-2y-4z} + B_0 e^{-x-4y-2z}); \quad v = \frac{1}{2} e^{\frac{21t}{\text{Re}}} (-A_0 e^{x-2y-4z} + 2C_0 e^{x+4y+2z}); \\ w &= \frac{1}{2} e^{\frac{21t}{\text{Re}}} (B_0 e^{-x-4y-2z} - 4C_0 e^{x+4y+2z}); \quad p - p_0 = gz + e^{\frac{42t}{\text{Re}}} \left(\frac{1}{4} A_0 B_0 e^{-6y-6z} + 3A_0 C_0 e^{2x+2y-2z} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

Путем непосредственной подстановки можно проверить, что выражения (22) и (24) представляют точные решения 3D уравнений Навье – Стокса (1)–(4). Указанные решения являются новыми.

Имея своей целью выявить качественные закономерности, зададим физические характеристики морской воды, а именно плотность и коэффициент кинематической вязкости. При нормальных условиях эти величины определяются значениями

$$\rho = 1,024 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad \nu = 1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Зададим также масштабы скорости и длины, согласовав их с известными описаниями волн убийц [3], [4]. Полагаем $L_0 = 60$ м и $U_0 = 1$ м/с. Тогда масштабы времени и давления получаются, как $T_0 = 60$ с и $P_0 = 1,024 \cdot 10^3$ Н/м². Для числа Рейнольдса в рассматриваемом случае получим значение $\text{Re} = 0,596 \cdot 10^{-4}$. С учетом указанного выбора масштабов отметим некоторые свойства решений уравнений (22) и (24).

1. Все функции, определяющие правые части уравнений (22) и (24), являются возрастающими функциями времени. Этот факт объясняется тем, что множители при t в показателях степени экспонентов положительны. Применяя принятую терминологию, можно констатировать, что декременты возрастания положительны. Для первого решения декремент равен $\frac{6}{\text{Re}}$ для скоростей и $\frac{12}{\text{Re}}$ для давления. Для второго решения $\frac{21}{\text{Re}}$ и $\frac{42}{\text{Re}}$ соответственно. Поскольку для вязкой жидкости $\text{Re} > 0$, все указанные значения заведомо положительны, и функции, фигурирующие в уравнениях (22) и (24), неограниченно возрастают во времени.

Другие свойства предлагается рассмотреть, задавая конкретные значения для начальных условий (20). Положим в качестве примера:

$$A_0 = 2; \quad B_0 = \frac{1}{3}; \quad C_0 = 1. \quad (25)$$

2. Рассмотрим вертикальную скорость $w(x, y, z, t)$. В частности, рассмотрим $w(0, 0, z, t)$ и определим, когда эта величина обращается в нуль. Для пп. 1, на основании третьего из выражений (22), получим

$$e^{\frac{6t}{\text{Re}}} \left(\frac{1}{3} e^{-2z} - e^{2z} \right) = 0.$$

Решение этого уравнения не зависит от t и в результате несложных вычислений получаем $z_0 = -0,275$. В размерных единицах это значение соответствует $-16,48$, т. е. данное значение соответствует точке, находящейся ниже свободной поверхности на глубине около $16,5$ м. Причем в окрестности этой отметки $w(0, 0, z, t)$ имеет противоположные знаки. Эта величина отрицательна выше этой отметки и положительна в обратном случае. Таким образом, вблизи этой точки характер движения будет вихревым.

Для решения пп. 2 ситуация аналогичная. На основании третьего выражения из (24) получаем, что $w(0, 0, z, t) = 0$, когда выполнено условие $\frac{1}{3} e^{-2z} - 4e^{2z} = 0$. Это уравнение имеет единственное решение $z = -0,621$. В размерных единицах данное значение соответствует отметке уровня $-37,27$ м. Выше этой отметки величина $w(0, 0, z, t)$ отрицательна и положительна в обратном случае. Этот эффект усиливается благодаря наличию возрастающего во времени множителя $e^{\frac{2t}{\text{Re}}}$. Так что вблизи значения $z = z_0$ движение имеет выраженный вихревой характер.

3. Рассмотрим выражения для давления, представленные последними формулами в уравнениях (22) и (24). Определим, возможно ли обращение в нуль величины $p(x, y, z, t) - p_0$. Для первого решения равенство $p(x, y, z, t) - p_0 = 0$ при условии (25) приводит к уравнению

$$gz + \frac{1}{2} e^{\frac{12t}{\text{Re}}} \left(\frac{1}{3} e^{-3y-3z} - 3e^{2x-y+z} \right) = 0. \quad (26)$$

Данное уравнение определяет некоторую поверхность, причем поверхность задается неявным образом, поскольку выражения для z как явной функции x и y из уравнения (26) получить нельзя. Однако представляется возможным получить уравнение линии, вдоль которой данная поверхность пересекается с горизонтальной плоскостью $z = 0$. Подставляя $z = 0$ в уравнение (26), приходим к равенству $e^{2x+2y} = \frac{1}{9}$, из которого следует

$$x + y = -1,099. \quad (27)$$

Рассмотрим аналогичный вопрос для пп. 2 решения, определяемого формулами (24). Для этого случая равенство $p(x, y, z, t) - p_0 = 0$ при $z = 0$ приводит к уравнению

$$\frac{B_0}{12C_0} + e^{2x+8y} = 0.$$

При выборе B_0 и C_0 , в соответствии с уравнением (25), данное уравнение решений не имеет. Таким образом, можно констатировать, что при $z > 0$ уравнение $p(x, y, z, t) - p_0 = 0$ также не имеет решений.

4. Определим область значений x, y, z , когда вертикальная скорость обращается в нуль. Для этого рассмотрим равенство $w(x, y, z, t) = 0$. Для решения пп. 1, когда вертикальная скорость определяется третьей формулой из (22), указанное условие приводит к уравнению

$$\frac{B_0}{C_0} - e^{2x+2y+4z} = 0,$$

откуда получим $x + y + 2z = \frac{1}{2} \ln \frac{B_0}{C_0}$. При условиях (25) правая часть последнего равенства соответствует значению $-0,549$. Таким образом, получаем уравнение плоскости в виде

$$x + y + 2z = -0,549. \quad (28)$$

Вдоль этой плоскости вертикальная скорость изменяет знак. Для точек, расположенных выше данной плоскости, вертикальная скорость отрицательна и, наоборот, вертикальная скорость положительна для всех точек, расположенных ниже плоскости, определяемой уравнением (28). Вдоль данной плоскости образуются вихри. С течением времени вихревой характер движения усиливается благодаря наличию в выражении для $w(x, y, z, t)$ множителя $e^{\frac{6t}{\text{Re}}}$. Причем усиленное

вихреобразование идет из глубины и затрагивает зону, непосредственно примыкающую к поверхности. Обращает на себя внимание следующее обстоятельство: плоскость, вдоль которой вертикальная скорость изменяет знак, параллельна плоскости, задаваемой уравнением (27). Заметим также, что для второго решения при условиях (25) уравнение $w(x, y, z, t) = 0$ решений не имеет, и значит, множества, где вертикальная скорость изменяла бы знак, не существует.

5. Рассмотрим поверхность горизонта $z = 0$ и попытаемся хотя бы приближенно определить область, где наиболее вероятно появление волн-убийц. Такая возможность представляется лишь для решения пп. 1. Рассмотрим равенство (27) и равенство (28) при $z = 0$. В результате на свободной поверхности получаем две прямые, определяемые уравнениями $x + y = -1,009$; $x + y = -0,549$. Данные прямые параллельны и расстояние между ними равно 0,389, что в размерных единицах соответствует 23,32 м. Для всех точек, лежащих в области, ограниченных этими прямыми, разность $p - p_0$ отрицательна, тогда как вертикальная скорость положительна. Третьей границей интересующей нас области на плоскости $z = 0$ является прямая, вдоль которой $v(x, y, 0, t) = 0$. С учетом второй формулы из (22) приходим к уравнению $\frac{A_0}{2C_0} - e^{3y} = 0$, откуда, на основании условий (25), получим $y = 0$. Вдоль линии, определяемой этим уравнением, поперечная скорость изменяет знак. Причем этот эффект, так же, как и в предыдущем случае, многократно усиливается с течением времени благодаря наличию множителей в виде экспонентов с положительными декрементами. Таким образом, для первого решения создаются предпосылки для образования буруна (вертикальной волны больших размеров) внутри области, ограниченной прямыми $x + y = -1,009$, $x + y = -0,549$ и $y = 0$. При решении пп. 2 ничего подобного не возникает ввиду того, что уравнение $p(x, y, 0, t) - p_0 = 0$ решений не имеет.

Зададимся вопросом о профиле волны, возникающей на поверхности в результате движения в соответствии с решением пп. 1. При этом необходимо учесть следующий известный факт: в результате движения свободная поверхность принимает форму, отличную от горизонтальной плоскости $z = 0$. Однако вдоль свободной поверхности выполнено условие [13] $p - p_0 = 0$. Если предположить, что свободная поверхность задается некоторым уравнением $z = h(x, y)$, то для определения правой части достаточно в уравнении (26) принять $z = h$. После несложных преобразований уравнение свободной поверхности принимает вид

$$ghe^{-h} + \frac{1}{6}e^{\frac{12t}{Re}}e^{-3y-4h} - \frac{3}{2}e^{2x-y} = 0. \quad (29)$$

Данное уравнение определяет высоту свободной поверхности $h(x, y)$ над уровнем горизонта как функцию координат x и y . Число Рейнольдса (Re) и безразмерное ускорение свободного падения g являются в уравнении (29) параметрами. Уравнение является трансцендентным и определяет $h(x, y)$ неявным образом для каждого момента времени t . На основании уравнения (29) можно проследить временную эволюцию волны и ее форму.

Обсуждение (Discussion)

Таким образом, классические 3D уравнения Навье – Стокса позволяют описать зарождение и эволюцию волн-убийц. В отличие от исследований [1]–[8], представляется возможным рассмотреть не только поверхностную, но и связанную с ней глубинную фазу движения волны. При этом оказывается возможным рассчитать границы области выхода волны на поверхность и определить профиль волны в каждый момент времени $t > 0$. Из уравнения (29) следует, что величина $h(x, y)$ может принимать как положительные, так и отрицательные значения, а значит, возможна волна в виде гребня, когда $h(x, y) > 0$, но возможна и волна в виде впадины, когда $h(x, y) < 0$.

В отличие от работ [6]–[8], данное исследование позволяет сделать вывод о том, что при формировании волны-убийцы существенную роль играет трехмерный характер движения и вязкость среды. Именно благодаря свойству вязкости гидромеханические характеристики движения при-

обращают возрастающие во времени экспоненциальные множители с положительными декрементами, зависящими от числа Рейнольдса.

Выводы

1. Рассмотренные в исследовании свойства решений позволяют заключить, что первое решение уравнений Навье – Стокса, задаваемое выражениями (22), соответствует движению жидкой среды, которое теоретически может привести к образованию волн-убийц.

2. Важным фактором для появления волн-убийц на поверхности являются условия (25), а значит, начальные условия для уравнений Навье – Стокса во многом определяют появление волны на поверхности.

3. Второе решение, задаваемое выражениями (24), обладает не всеми свойствами, присущими первому решению, оно не описывает движения с образованием волн-убийц.

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. Nikolkina I. Rogue waves in 2006-2010 / I. Nikolkina, I. Digenkulova // Natural Hazards & Earth System Sciences. — 2011. — Vol. 11. — Pp. 2913–2924. DOI: 10.5194/nhess-11-2913-2011.
3. Пелиновский Е.Н. “Фрики” – морские волны-убийцы / Е. Н. Пелиновский, А. В. Слюняев // Природа. — 2007. — № 3 (1099). — С. 14–23.
4. Rosenthal W. Rogue-waves: results of the MaxWave Project / W. Rosenthal, S. Lehner // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2008. — Vol. 130. — Is. 2. DOI: 10.1115/1.2918126.
5. Шамин Р. В. О существовании гладких решений уравнений Дзяченко, описывающих неустановившееся течение идеальной жидкости со свободной поверхностью / Р. В. Шамин // Доклады Российской Академии Наук. — 2006. — Vol. 406. — Is. 5. — Pp. 614–615.
6. Шамин Р. В. Математические вопросы волн-убийц / Р. В. Шамин. — М.: Лепард URSS, 2016.
7. 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.
8. Kurkina O. E. Structure of currents in the soliton of an internal wave / O. E. Kurkina, A. A. Kurkin, E. N. Pelinovskiy, S. V. Semin, T. G. Talipova // Oceanology. — 2016. — Vol. 56. — № 6. — Pp. 767–773. DOI: 10.1134/S0001437016060072.
9. Дорожко В. М. Опрокидывание контура морского судна волной-убийцей / В. М. Дорожко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 31–41. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-31-41.
10. Дорожко В. М. Оценка параметрической области опрокидывания контура морского судна на волне-убийце / В. М. Дорожко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2(36). — С. 16–26.
11. Saprykina Y. V. Abnormally high waves due to spectral instability of surface waves / Y. V. Saprykina, S. Y. Kuznetsov // Oceanology. — 2016. — Vol. 56. — Is. 3. — Pp. 355–362. DOI: 10.1134/S0001437016030188.
12. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1987. — 833 с.
13. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. — М.: Наука, 1976. — Т.2. — 573 с.
14. Koptev A. V. Integrals of Motion of an Incompressible Medium Flow. From Classic to Modern / A. V. Koptev // Handbook on Navier – Stokes Equations. Theory and Applied Analysis. — New York: Nova Science Publishers, 2017. — Pp. 443–459.
15. 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.
16. Коптев А. В. Точные решения уравнений Навье – Стокса / А. В. Коптев // Некоторые актуальные проблемы современной математики и математического образования. Герценовские чтения-2019. — СПб.: Изд-во РГПУ им. А. Н. Герцена, 2019. — С. 63–68.
17. Koptev A. V. New Solutions of 2D Navier – Stokes Equations / A. V. Koptev, E.M. Pastushok // American Scientific Journal. — 2017. — Is. 17. — Pp. 4–7.
18. Коптев А. В. Динамические реакции подводного трубопровода на морские течения / А. В. Коптев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 107–114.

19. 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. DOI: 10.1134/S2304487X1406008X.

REFERENCES

1. Kurkin, A. A., and E. N. Pelinovskii. *Volny-ubiitsy: fakty, teoriya i modelirovanie*. N. Novgorod: NNGTU, 2004.
2. Nikol'skaya, I., and I. Didenkulova. "Rogue waves in 2006-2010." *Natural Hazards & Earth System Sciences* 11 (2011): 2913–2924. DOI: 10.5194/nhess-11-2913-2011.
3. Pelinovsky, E. N., and A. V. Slunyaev. "“Freak Waves”, or Sea Killer Waves." *Nature* 3(1099) (2007): 14–23.
4. Rosenthal, Wolfgang, and Susanne Lehner. "Rogue waves: Results of the MaxWave project." *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 130.2 (2008). DOI: 10.1115/1.2918126.
5. Shamin, R. V. "On Existence and Unique Smooth Solutions of Dyachenko's Equations Describing Nonstationary Motion of Ideal Liquid with Free Boundary." *Doklady Akademii Nauk* 406.5 (2006): 614–615.
6. Shamin, R. V. *Matematicheskie voprosy voln-ubiits*. M.: Lepard URSS, 2016.
7. Zakharov, V. E. "‘Ustoichivost’ periodicheskikh voln konechnoi amplitudy na poverkhnosti glubokoi zhidkosti." *Zhurnal prikladnoi mekhaniki i tekhnicheskoi fiziki* 9.2 (1968): 86–94.
8. Kurkina, O. E., A. A. Kurkin, E. N. Pelinovskiy, S. V. Semin, and T. G. Talipova. "Structure of currents in the soliton of an internal wave." *Oceanology* 56.6 (2016): 767–773. DOI: 10.1134/S0001437016060072.
9. Dorozhko, V. M. "Capsizing of seagoing vessel contour due to ‘rogue wave’." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 31–41. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-31-41.
10. Dorozhko, Veniamin Mefod'evich. "Estimation of parametric range of capsizing of seagoing vessel contour in ‘rogue wave’." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 16–26.
11. Saprykina, Ya V., and S. Yu Kuznetsov. "Abnormally high waves due to spectral instability of surface waves." *Oceanology* 56.3 (2016): 355–362. DOI: 10.1134/S0001437016030188.
12. Loitsyanskii, L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza*. M.: Nauka, 1987.
13. Sedov, L. I. *Mekhanika sploshnoi sredy*. Vol. 2. M.: Nauka, 1976.
14. Koptev, A. V. "Integrals of Motion of an Incompressible Medium Flow. From Classic to Modern." *Handbook on Navier – Stokes Equations. Theory and Applied Analysis*. New York: Nova Science Publishers, 2017. 443–459.
15. Koptev, Alexander V. "How to Solve 3d Navier - Stokes Equations." *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences* 173 (2015): 7–15.
16. Koptev, A. V. "Tochnye resheniya uravnenii Nav'e – Stoksa." *Nekotorye aktual'nye problemy sovremennoi matematiki i matematicheskogo obrazovaniya. Gertsenovskie chteniya - 2019*. SPb.: Izd-vo RGPU im. A. N. Gertsena, 2019. 63–68.
17. Koptev, A. V., and E. M. Pastushok. "New Solutions of 2D Navier – Stokes Equations." *American Scientific Journal* 17 (2017): 4–7.
18. Koptev, A. V. "Dynamic response of an underwater pipeline on the sea currents." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(26) (2014): 107–114.
19. Koptev, Alexander V. "The Structure of Solution of the Navier – Stokes Equations." *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI"* 3.6 (2014): 656. DOI: 10.1134/S2304487X1406008X.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Коптев Александр Владимирович —
кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Alex.Koptev@mail.ru, kaf_math@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Koptev, Alexandr V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: Alex.Koptev@mail.ru, kaf_math@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2020 г.
Received: February 25, 2020.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301

SEISMIC SURVEY IN THE TRANSIT ZONE. FULL-SCALE TESTS OF THE KRAB SYSTEM. STAGE 1

D. A. Ilinskiy, K. A. Roginskiy, O. Y. Ganzha

Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

Transit zones occupy a significant area of the coastal seas of the Russian Federation and have a great potential for hydrocarbon production. For exploring the hydrocarbon reserves in the transit zones, it is necessary to apply special equipment and methods of work. Currently, seismic survey in the transit zone is mainly carried out by imported equipment. Testing a new domestic system of KRAB seismic bottom stations is considered in the paper. At the first stage, the task to test 10% of randomly selected seismic bottom stations (SBS) out of 400 pieces is set. The test methodology consists of the following tasks: checking the correct location of the SBS center of mass to ensure proper installation on the bottom, testing the launching and lifting devices to install the SBS on the bottom subject to safety regulations on the vessel, conducting experiments with a seismic source to determine the operability of the SBS receiving channel, testing the bottom stations for the identity of seismic channels, software verification in the field.

A technical description of the system and the results of the first stage of field tests are given in the paper. It can be confidently concluded that, in principle, the equipment in the form of separate SBS works within the parameters of the technical task and complies with the foreign analogues. However, in general, the complex is not ready not only for industrial testing, but even for full-scale testing and needs to be substantially improved. The rework should consist of the following: the compass and tiltmeters alignment, increasing the memory for collecting non-seismic data, reducing the excessive sensitivity of hydrophones, and developing a new complex of launching and lifting devices. The software needs to be modified to service the entire complex of 400 SBS.

The performed tests represent only the first stage of testing the KRAB system since the equipment has a number of significant drawbacks after elimination of which it is necessary to fully test the system.

Keywords: transition zones, import substitution, seismic survey, autonomous seismic bottom station.

For citation:

Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in the transit zone. Full-scale tests of the KRAB system. Stage 1." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.

УДК 550.834.08

СЕЙСМОРАЗВЕДКА В ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЕ. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ «КРАБ» (ЭТАП 1)

Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Российская Федерация

Отмечается, что транзитные зоны занимают значительную площадь прибрежных морей Российской Федерации и имеют большой потенциал для добычи углеводородов. Для разведки их запасов в транзитных зонах необходимо применять специальное оборудование и методику работ. Известно, что в настоящее время сейсмическая разведка в транзитной зоне в основном производится импортным оборудованием. В статье выполнено исследование испытаний новой отечественной системы сейсмических донных станций «КРАБ». Задачей первого являлось проведение натурных испытаний 10 % случайно выбранных сейсмических донных станций из общего количества 400 шт. Методика испытаний состояла из следующих задач: проверки корректного расположения центра массы сейсмических донных станций для обеспечения правильной установки на дно, испытания спуско-подъемных устройств для установки сейсмических донных

станций при соблюдении норм техники безопасности на судне, проведения экспериментов с сейсмическим источником для выявления работоспособности приемно-регистрирующего тракта сейсмических донных станций, испытания донных станций на идентичность сейсмических каналов, проверки программного обеспечения в полевых условиях.

В статье дано техническое описание системы и приведены результаты первого этапа натурных испытаний, на основе которых можно сделать заключение, о том, что аппаратура в виде отдельных станций работает в пределах параметров технического задания и соответствует зарубежным аналогам, однако в целом комплекс не готов не только к промышленным, но и к натурным испытаниям и нуждается в существенной доработке, которая должна состоять в юстировке компаса и наклономеров, увеличении памяти для сбора не сейсмических данных, уменьшении излишней чувствительности гидрофонов, разработке нового комплекса спуско-подъемного устройства. Программное обеспечение нуждается в доработке для обслуживания всего комплекса, состоящего из 400 сейсмических донных станций. Проведенные испытания представляют первый этап тестирования системы «КРАБ». Аппаратура имеет целый ряд существенных недостатков, после устранения которых необходимо выполнить процедуру тестирования системы в полном объеме.

Ключевые слова: транзитные зоны, импортозамещение, сейсморазведка, автономные сейсмические донные станции.

Для цитирования:

Ильинский Д. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы «КРАБ» (этап 1) / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.

Введение (Introduction)

Транзитные зоны занимают значительную площадь прибрежных морей Российской Федерации и имеют большой потенциал для добычи углеводородов (УВ). Для разведки запасов УВ в транзитных зонах необходимо применять специальное оборудование и методику работ. Фактически, в нашей стране сейсмическая разведка в транзитной зоне в основном производится импортным оборудованием. Статья посвящена обоснованию выбора метода исследований и аппаратуры созданной отечественной системы сейсмических донных станций (СДС) «КРАБ». Отмечается, что выбранный метод отвечает современным трендам мировых стандартов производства работ на шельфе.

Важным этапом внедрения системы в промышленную эксплуатацию являются, наряду с заводскими лабораторными испытаниями, испытания в реальных морских условиях ограниченного количества аппаратуры. Была разработана методика проверки всего комплекса, в соответствии с которой составлен план работ. Описан процесс испытаний, методы обработки данных и сделаны выводы о необходимости проведения масштабных испытаний на втором этапе.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Обоснование метода исследования и выбора аппаратуры для сейсмических работ в транзитных зонах. Транзитной зоной принято считать мелководную часть моря от нулевой глубины до глубин воды, где могут работать суда с буксируемыми сейсмическими косами. Эта граница весьма расплывчата и зависит от конкретных условий. Минимально допустимая глубина для обычных сейсмических судов, которая составляет 20 м, может быть понижена до 4 м для специальных мелководных сейсмических судов. Конкретные условия работы, такие как узкости, течения, препятствия могут отодвигать границу минимально допустимых глубин на десятки метров. К транзитным зонам также следует отнести районы вокруг морских платформ [1].

С точки зрения технических решений транзитные зоны требуют особого подхода в каждом конкретном случае. Буксируемые кабельные системы с регистрацией в реальном времени не всегда легко применимы в зонах с подводными препятствиями: корягами, затонувшими судами, подводными трубопроводами и скальными выходами. Постоянные зацепы и обрывы выводят из строя косы, которые трудно восстановимы в полевых условиях. При этом реальная глубина постановки

донных кос, даже с применением малой механизации, практически ограничена расстоянием 40 м. Суда со специальными укладчиками являются громоздкими, дорогостоящими, имеют большую осадку и не могут работать на мелководье [2], [3].

В последнее время все большее признание получают *донные системы автономной регистрации*. При этом необходимо отметить, что прием и запись данных на дне дает гораздо больше сейсмической информации, чем при малом заглублении приемных средств от поверхности воды при помощи буксируемых кос [4]. Это связано с ее естественными свойствами, когда приемная система на дне механически не связана с излучающим судном, а также с многокомпонентностью записываемого волнового поля. Прием данных на дне может содержать важную информацию о детальном глубинном строении земной коры для картирования поверхности фундамента или решения вопросов о происхождении углеводородов [5].

Развитие электронной элементной базы привело к большой надежности автономных сейсмических регистраторов (донных станций), которые не требуют проверки работоспособности в реальном времени. Наибольшее распространение получили донные станции компании «Фаерфилд» (Fairfield, <http://fairfieldgeo.com>), которая являлась одной из первых в этой области. Первую в мире трехмерную съемку с донными станциями выполнила в 2002 г. небольшая немецкая компания GEOPRO в Мексиканском заливе [6]. Вслед за компанией «Фаерфилд» создали свои станции и компании «ОЙО Геоспейс» (OYO Geospace, <https://www.geospace.com>), МагСейс (MagSeis, <https://magseisfairfield.com>) и инАйприл (inApril, <http://www.inapril.com>). Отличительной особенностью этой аппаратуры является *гирляндная система постановки*, когда отдельные станции соединены между собой кабель-тросом, образуя гирлянду.

Преимущество автономных систем записи, по сравнению с донными косами и регистрацией в реальном времени, состоит в легком регулировании интервала постановки датчиков, а зацепы троса за неоднородности дна не приводят к выходу из строя всей системы записи. Кроме указанных технических преимуществ, автономные системы с непрерывным циклом записи содержат дополнительную сейсмическую информацию, которая позволяет применять методы пассивной сейсмической обработки для определения важных геологических характеристик разреза [7]. Однако гирляндный метод постановки, как и в случае донных кос, требует использования ручного труда или дорогостоящих механизмов автоматизации, устанавливаемых на относительно больших судах, которые, в свою очередь, тоже имеют ограничения для работы на мелководье. Это обстоятельство также приводит к удорожанию стоимости работ, что является существенным фактором при низкой стоимости углеводородов и ограниченном финансировании. Во всех указанных ранее системах применяются трехкомпонентные датчики OMNI-2400 [8], не требующие определенной ориентации на дне. Собственная частота принимаемых сигналов этих датчиков равна 14,5 Гц, поэтому, к сожалению, в процессе записи данных наблюдается потеря низких частот, которые необходимы для повышения глубинности, а также для интерпретации сейсмических данных на наличие / отсутствие УВ.

Российская сейсморазведка в начале 90-х гг. XX в. полностью перешла на использование импортного оборудования [9]. Исключения составляют донная коса для болот Марш-лайн [8] и станция «ЧЕРЕПАХА» [5]. Однако, ввиду различных причин, это оборудование большого пространства не получило и поэтому не может удовлетворить в полной мере потребности отечественной сейсморазведки в транзитных зонах. Последнее время наблюдается проявление интереса научных организаций и частных компаний к разработке отечественных автономных донных сейсмических станций. В связи с этим появилась надежда, что и отечественные производители смогут производить собственное качественное конкурентоспособное оборудование для работы на дне [5], [10], [11].

Развитие разведки в транзитных зонах является важным направлением работы ввиду следующих причин:

- месторождения на суше легкодоступны и практически исследованы;
- морские месторождения перспективны, но их освоение является весьма дорогостоящим.

Несмотря на то, что месторождения в транзитных зонах более доступны для разработки, они, в отличие от морских зон, требуют особого подхода при выполнении разведки. В этой связи правительством Российской Федерации взят курс на импортозамещение в условиях усиливающихся санкций Запада. В этой связи создание системы «КРАБ», в основе которой лежит передовой метод использования автономных донных сейсмических модулей, является своевременным решением проблем освоения Российских транзитных зон.

Техническое описание системы сейсмических донных станций. Мобильный аппаратно-программный комплекс морской сейсморазведки и мониторинга в транзитных зонах и на шельфе на основе четырехкомпонентных автономных сейсмических донных станций нового поколения предназначен для проведения сейсмических исследований на дне акваторий морей и океанов на глубине до 500 м. Комплекс состоит из четырехсот СДС, транспортировочных стеллажей, находящихся в контейнере-лаборатории, и мобильных спуско-подъемных механизмов (СПУ). Конструктивно все СДС, входящие в состав комплекса, одинаковы и отличаются только идентификационными номерами.



Рис. 1. Один модуль сейсмической донной станции с двумя отвязками с карабинами на концах для подсоединения к общему несущему кабель-тросу

В состав мобильного аппаратно-программного комплекса входит следующее оборудование: СДС (рис. 1) — состоит из аппаратной и программной частей. Аппаратная часть включает корпус с расположенным на нем электрическим разъемом для подзарядки аккумуляторов, управления донной станцией и скачивания информации, светодиод-индикатор и вакуумный порт. Внутри корпуса СДС расположены:

- блок сейсмоприемников, состоящий из правой ортогональной тройки двух горизонтальных геофонов GS-20DX и одного вертикального GS-30CT, имеющих частотный диапазон входных сигналов 8–250 Гц и чувствительность 27,5 В/м/с с допустимым углом наклона от вертикали до 20° [8] (ось X ортогональной тройки параллельна оси магнитного датчика компаса-инклинометра);

- измерительный гидрофон ГС-10 с рабочим диапазоном 2–600 Гц;
- компас-инклинометр, который служит для определения ориентации СДС в пространстве;
- регистратор, обеспечивающий прием, усиление, преобразование и запись в цифровом виде сейсмической информации, получаемой от трех геофонов и гидрофона.

Программная часть СДС включает программное обеспечение низкого уровня, осуществляющее функционирование СДС во всех режимах работы и взаимодействие с оборудованием контейнера-лаборатории.

Контейнер-лаборатория (КЛ) — состоит из аппаратной и программной частей.

Аппаратная часть КЛ имеет в своем составе следующее оборудование:

– стеллажи рабочие, обеспечивающие работу одновременно 384 СДС, еще 16 СДС находятся в резерве и размещены в отдельном стеллаже;

– зарядные устройства;

– соединительные кабели с раземами к СДС.

Аппаратная часть обеспечивает:

– зарядку аккумуляторов СДС;

– синхронизацию часов СДС по сигналам GPS;

– управление режимами работы СДС.

Программная часть КЛ обеспечивает проверку СДС, калибровку часов СДС, задание режимов работы СДС. Связь с программным обеспечением КЛ осуществляется через разъем на корпусе СДС.

Спуско-подъемные механизмы (СПУ), в составе которых находятся следующие элементы:

– грузоподъемное устройство типа «шпиль» — 2 шт.;

– подмотчик грузонесущей линии — 2 шт.;

– кормовые ролы — 2 шт.;

– рабочая площадка;

– рольганг;

– стойки преобразователей для управления мотор-редукторами — 3 шт.

Внешний вид основных элементов комплекса, установленных на судне, приведен на рис. 2.

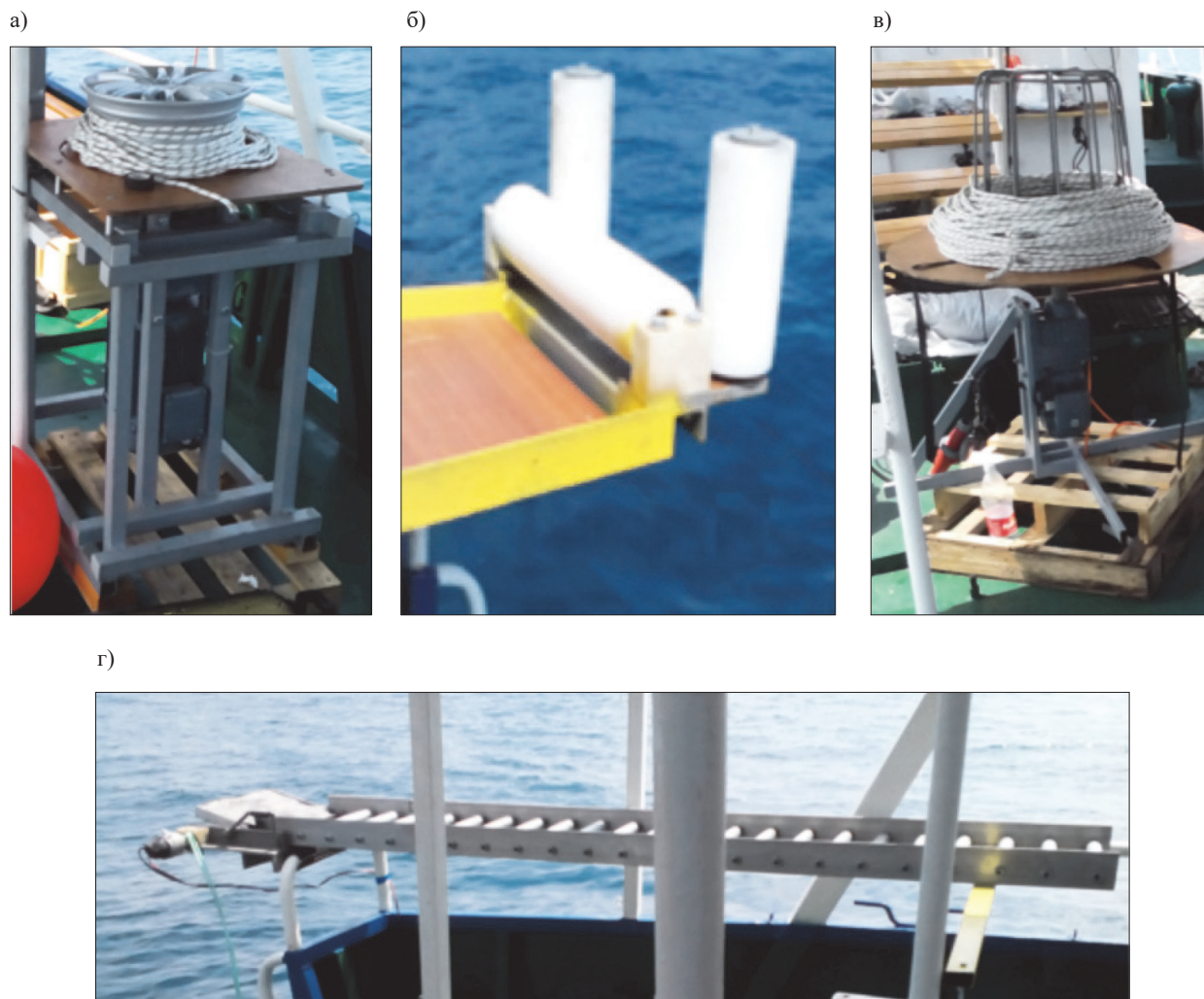


Рис. 2. Спуско-подъемное устройство установленное на корме НИС «Парус»: а — шпиль; б — кормовой ролл; в — подмотчик; г — рольганг с площадкой сброса

Опытные испытания и результаты (Pilot Tests and Results)

Опытные натурные испытания проводились на базе Южного отделения Института океанологии РАН им. П. П. Ширшова РАН в г. Геленджике в августе 2017 г. Далее приведены описания стадий испытаний и их результаты.

Испытание положения СДС на дне. Производился свободный сброс с пирса одиночной СДС, не связанной с остальными СДС в гирлянду при трех начальных положениях корпуса: горизонтальном положении, вертикальное положение и дном вверх. Испытания проводились на пирсе высотой 1,5 м над уровнем воды на глубине 5,5 м. Процесс погружения СДС на дно и ее положение на дне фиксировалось подводной съемкой. Установлено, что независимо от начального положения СДС в момент сброса, СДС встает на дно нижней стороной. Для переворота СДС из горизонтального положения дном вверх в положение дном вниз необходимо приблизительно 2 м. Результаты эксперимента показали хорошую центровку станции и удачное размещение центра тяжести. Это свойство позволяет не контролировать положение станции в момент сброса, что важно при массовой промышленной работе.

Испытание на профиле 40 донных станций, привязанных к общему несущему кабель-тросу. Целью испытаний являлось тестирование элементов системы СДС, элементов КЛ и СПУ. Для испытаний была сделана произвольная выборка из 40 донных станций. СДС с помощью однометровых одиночных отвязок прикреплялись к постановочному кабель-тросу через интервал 27 м и в такой конфигурации устанавливались на дно. В границах линии расстановки станций были установлены концевые буи с грузами. Скорость движения судна-постановщика составляла 3,5 уз, это минимальная скорость, обеспечивающая удержание судна на профиле с техническими характеристиками СПУ. Координаты СДС фиксировались в момент входа станции в воду. Далее было выполнено 149 излучений сейсмического источника, в качестве которого использовался источник с объемом рабочей камеры 1,7 л [12]. Излучения проводились при давлении 130 бар каждые 10 с, что соответствовало расстоянию между каждым излучением 18,5 м с привязкой по времени излучения к определенному PPS-импульсу GPS-приемника. Точное время излучения и его координаты записывались навигационной системой (рис. 3).

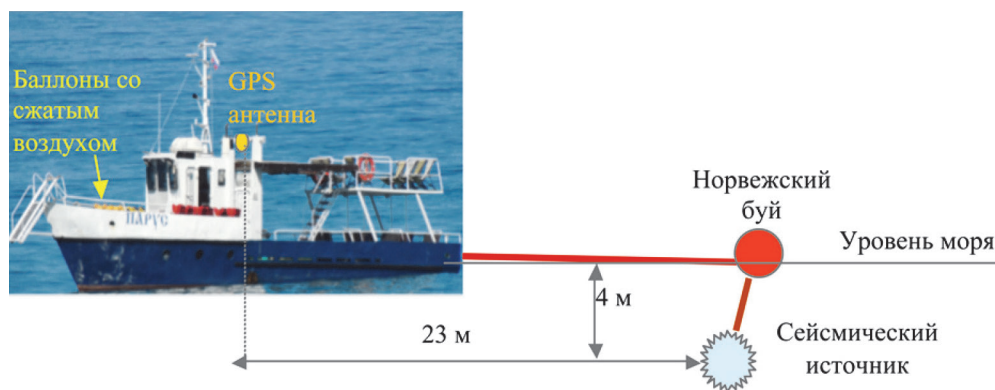


Рис. 3. Схема буксировки сейсмического источника на НИС «Парус» и расположение элементов навигационной системы

На рис. 4 показано положение источников излучения и донных станций в локальной системе координат, за ноль которой был принят самый западный выстрел (№ 149) на профиле, а направление продольной координаты выбиралось как линия линейной регрессии для всех проведенных излучений. Движение судна источника проводилось в сторону уменьшения горизонтальной координаты. Для преобразования локальных координат из системы UTM в локальную применялись следующие формулы:

$$Alf = 45,68582 \text{ град.};$$

$$x_0 = 415350,2 \text{ м};$$

$$y_0 = 4938822,6 \text{ м};$$

$$x = (X_UTM - x_0) \cos(alf) - (Y_UTM - y_0) \sin(alf);$$

$$y = (X_UTM - x_0) \sin(alf) + (Y_UTM - y_0) \cos(alf).$$

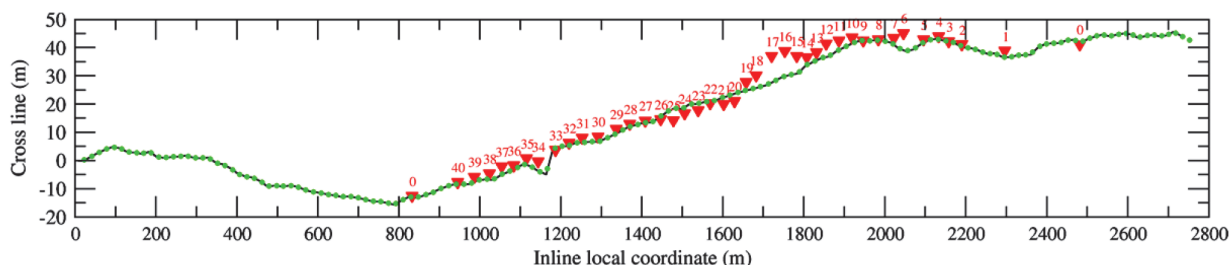


Рис. 4. Положение сорока сейсмических донных станций в локальной системе координат

Условные обозначения:

красные треугольники с номерами позиций над ними — положение СДС;
позиции «0» — расположение концевых грузов в начале и конце профиля;
зеленые точки — положение источника излучения

Положение станций на дне было проинспектировано водолазом с камерой. Анализ съемки показал, что в ряде случаев станции стоят на боковой стороне и в районе скальных выходов не имеют горизонтального положения (рис 5). Причина постановки на ребро состоит в том, что скорость постановки 3,5 уз слишком велика для интервала 25 м. Сброс следующей станции происходил тогда, когда предыдущая еще не легла на дно и станция протаскивалась по дну, становясь вертикально «на ребро».

а)



б)



Рис. 5. Примеры неудачного положения СДС на дне:

а — положение станции на скальном выходе; б — положение станции «на ребре»

После подъема на борт и опреснения станции отправляли в лабораторию для считывания и анализа информации. Записи всех четырех компонентов для излучения № 20 приведены на рис. 6, где по горизонтали цифрами отмечены номера позиций донных станций. Четыре панели представляют собой данные четырех компонентов, соответственно, сверху вниз — гидрофона H , вертикальной компоненты Z , первой горизонтальной X и второй горизонтальной Y компоненты. При анализе сейсмограм хорошо видны неправильно работающие компоненты. Также СДС с отклонениями от горизонтального положения более чем на 20° дали плохие записи на компонентах гидрофона.

Анализ сейсмограмм канала гидрофонов показал, что на самых ближних удалениях гидрофона от пункта возбуждения (до ± 13 м, если это знак предельного отклонения, то один знак

под другим) наблюдается превышение максимально возможного значения аналогового сигнала, подаваемого на АЦП. Значения углов дифферента, определенные инклинометрами СДС, находятся в пределах точности датчиков для станций, расположенных на дне горизонтально, и показывают наклоны для негоризонтальных станций. Выполнялось сравнение данных с визуальными наблюдениями водолаза, который сопровождал процесс постановки станций на дне.

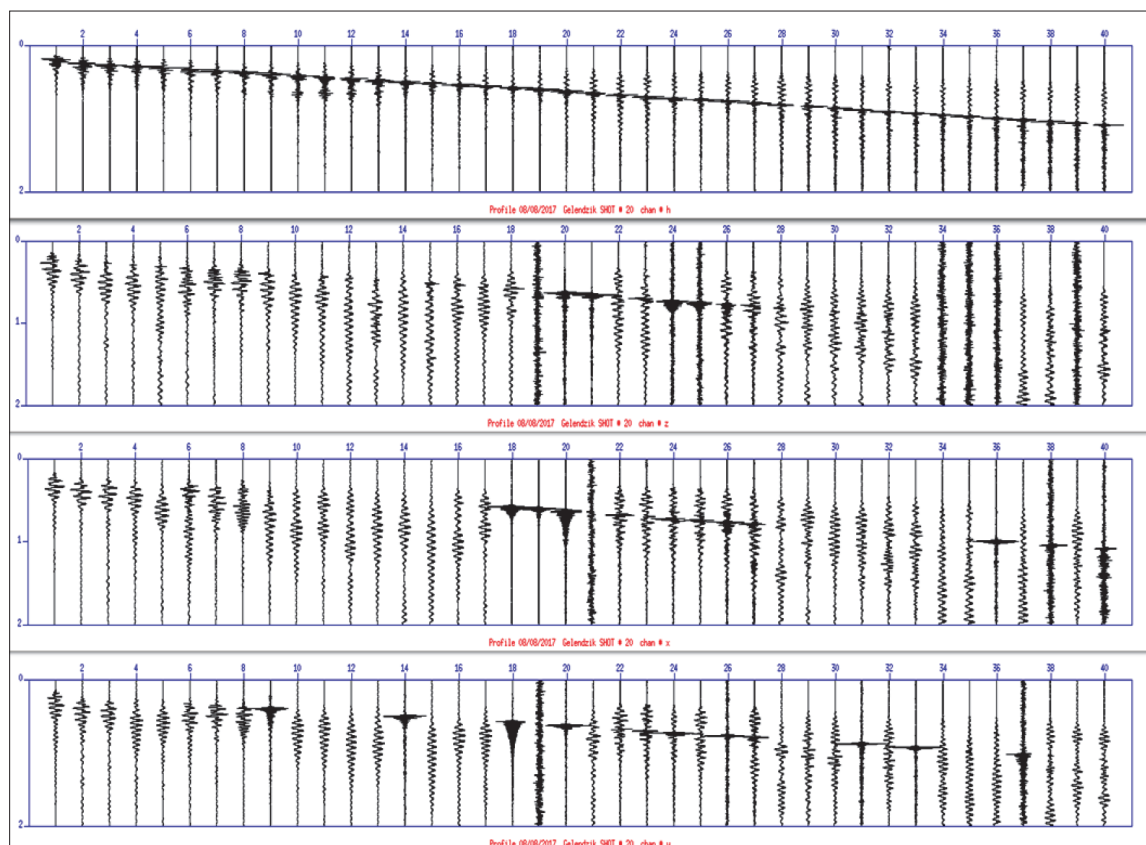


Рис. 6. Сейсмограмма общего пункта взрыва для излучения № 20

Испытания донных станций в одной точке на идентичность каналов, калибровка сигнала по измерениям на контрольной донной станции и изучение диаграммы направленности приема сейсмических сигналов. Группа из восьми станций была уложена на дне на глубине 28,5 м водолазами вокруг контрольной донной сейсмической станции ИО РАН. Станция имеет в своем составе три геофона GX-20 DX, аналогичных установленным на СДС (один вертикальный и два горизонтальных), подвешенных в кардане, гидрофон конструкции ОКБ ОТ и 24-разрядный, четырехканальный сейсмический регистратор «Геонод», имеющий характеристики, удовлетворяющие ТЗ комплекса «КРАБ».

Для максимального обеспечения пространственной ориентации станции устанавливались на дне вручную. Станции были сориентированы на север по положению герморазъемов. Станция ИО РАН была также сориентирована на север по метке на корпусе. После установки станций на дне проводилась отработка постановки сейсмическим источником, описание которого приведено на рис. 6. На рис. 7 показано положение группы станций и путь судна с сейсмическим источником, а также конфигурация станций на дне. Для оценки точности воспроизведения компонентов вектора смещения геофонным пакетом СДС на рисунке выбрано излучение № 120 второй прострелки. Эти данные были использованы для построения диаграммы трехмерных движений частиц грунта в проекциях на горизонтальную плоскость XU и две вертикальные взаимно перпендикулярные плоскости XZ и YZ в течение временного интервала, равного 0,25 с, включающего первые вступления. Для излучения № 120 в первые вступления выходит водная линейно-поляризованная волна.

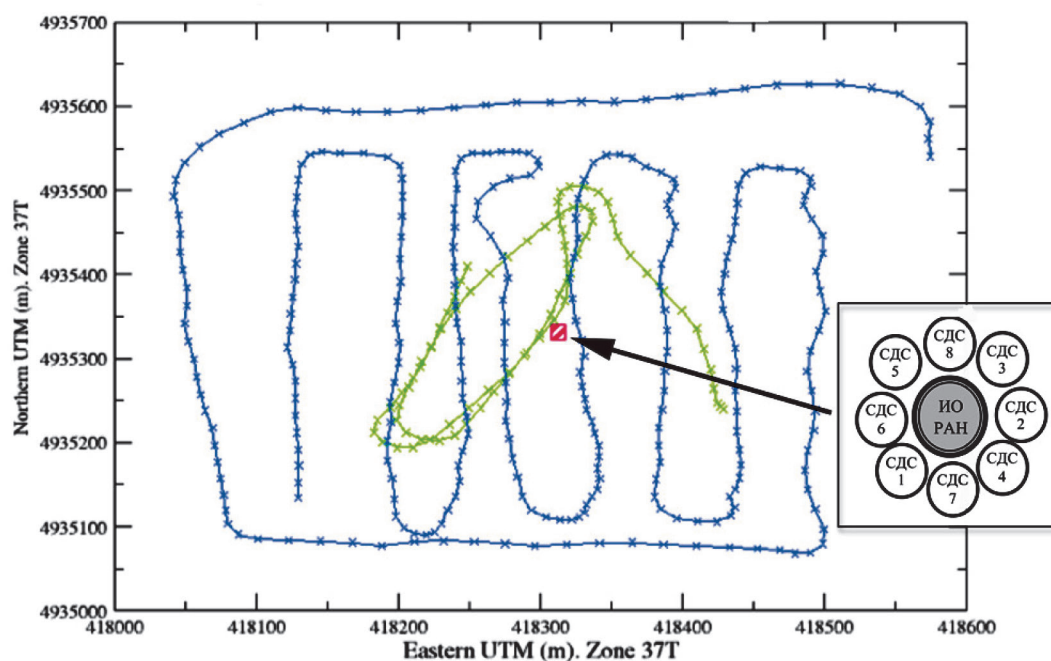


Рис. 7. Положение восьми донных станций КРАБ и станции ИО РАН

Условные обозначения:

красным квадратом отмечены донные станции и станции ИО РАН;

зелеными и синими линиями показаны две серии излучений;

координаты даны в метрах для проекции UTM зоны 37T над эллипсоидом WGS84

На рис. 8 приведена выборка диаграмм, представляющих различную степень поляризации. СДС на поз. 1–3 показывают узкий направленный эллипс колебаний и хорошую воспроизводимость линейно-поляризованной волны. СДС на поз. 6 показывают более размытую, но все же читаемую линейную поляризацию падающей волны. От общего ряда отличается станция на поз. 7 как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Полученные направления поляризации сигнала на станциях хорошо коррелируют с показаниями компаса, полученными на станциях.

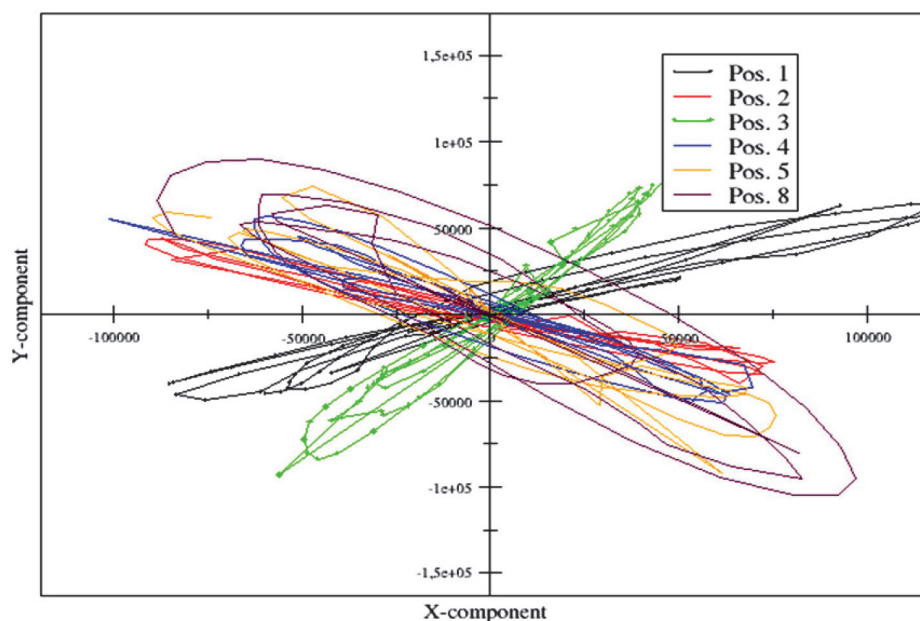


Рис. 8. Траектория движения частиц в горизонтальной плоскости ХУ для станций на поз. 1–5 и 8 в течение временного интервала 0,25 с от момента излучения

На рис. 9 представлены зарегистрированные данные 3Д геофонов без регулировки усиления. Видно ограничение амплитуды сигнала гидрофона на всех донных станциях, кроме поз. 7 и станции ИО РАН, стоящей на позиции 9. Амплитудно-частотная характеристика гидрофона станции на поз. 7 значительно отличается от гидрофонов в большинстве остальных станций. Амплитуда и знак первых вступлений (фаза сигнала) на горизонтальных компонентах станций значительно отличаются друг от друга, что свидетельствует об их случайной ориентации (в каждой станции по-своему) относительно направления на разъем. На рис. 9 по горизонтали отложено время в секундах с момента выстрела, а по вертикали — номер позиции донной станции согласно рис. 8.

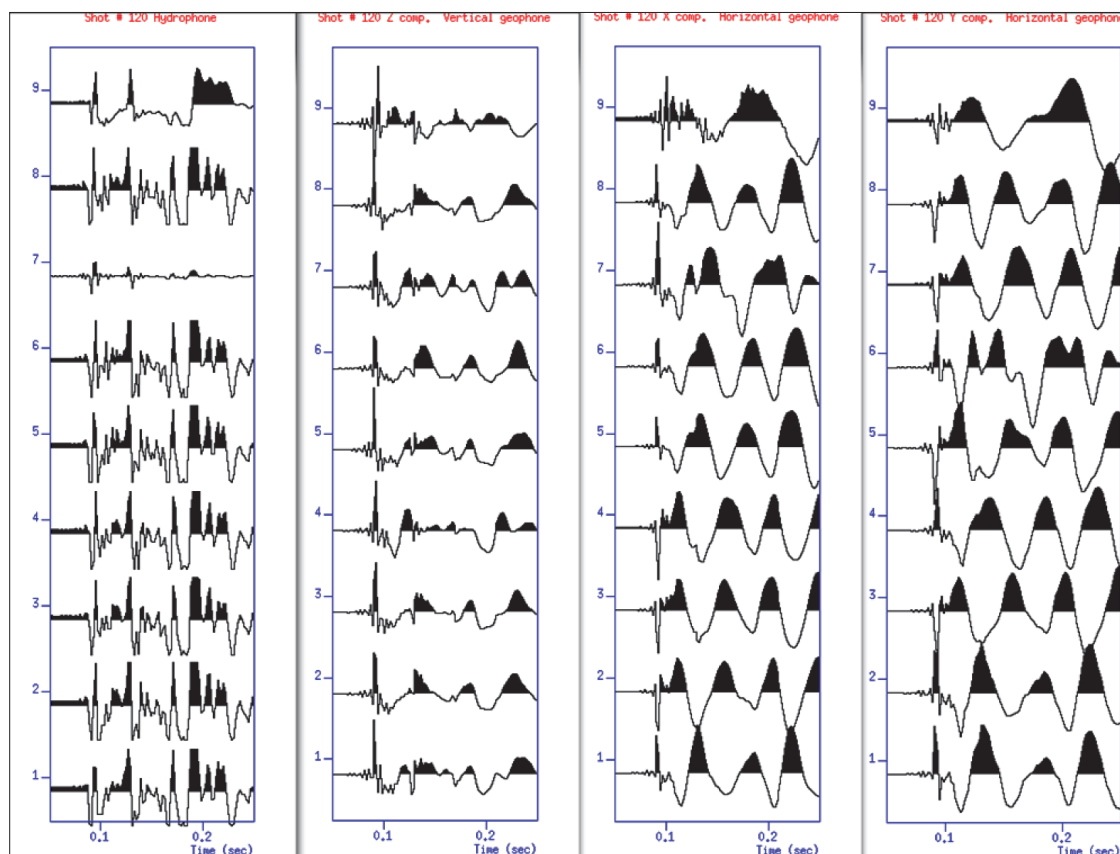


Рис. 9. Сейсмограмма общей точки излучения № 120 для гидрофона и трех компонентов геофонов для станций КРАБ на позициях 1–8

Для изучения диаграмм направленности датчиков донных станций использовались все полученные данные в прострелках 1 и 2 (см. рис. 7) вокруг тестовой расстановки донных станций. Анализируются амплитуды первых вступлений (с учетом знака) преломленной в скалистом дне волны со скоростью 3 км/с. Для каждой станции из расстановки пикировалась амплитуда первых вступлений без регулировки амплитуд и их усечения на всех компонентах. При этом была убрана постоянная составляющая. Пикированной амплитуде ставились в соответствие координаты излучения. Как видно из рис. 7, сейсмический источник отработал полигон не вполне равномерно по вертикальной (юг – север) и горизонтальной (запад – восток) координатам. В этой связи была проведена интерполяция полученных данных на равномерную сетку 10 м (по горизонтали) и 4 м (по вертикали) с помощью решения уравнения Лапласа для поверхности с минимальной кривизной, проходящей через измеренные данные.

Практически все диаграммы направленности для всех СДС показывают равномерную диаграмму направленности для вертикального геофона и гидрофона. Диаграммы имеют схожий между собой, а также с контрольной станцией ИО РАН вид. Различие диаграмм горизонтальных

компонентов между станциями объясняется их произвольной ориентацией из-за неверной калибровки компаса.

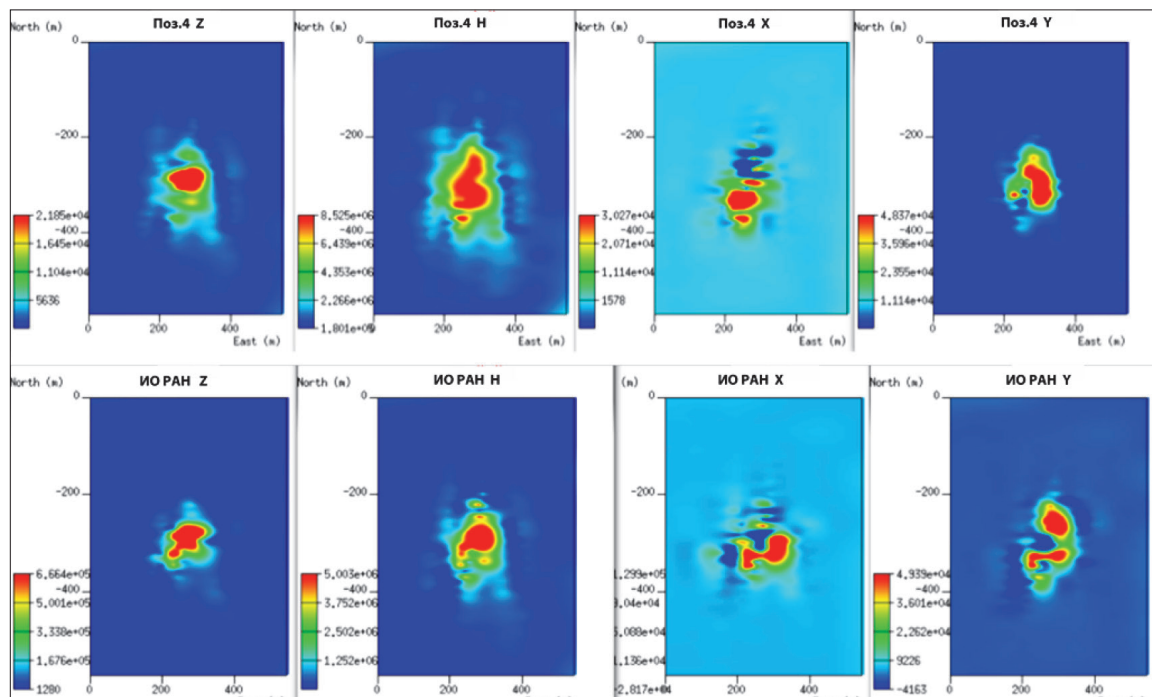


Рис. 10. Сравнение четырех компонентов диаграмм направленности приема сейсмического источника для СДС на позиции 4 и контрольной станции ИО РАН

В качестве примера на рис. 10 приведены диаграммы направленности контрольной станции (ИО РАН) и СДС на позиции 4 (см. рис. 7). Горизонтальные и вертикальные шкалы даны в метрах и составляют от 0 до 500 м.

Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion)

Натурным испытаниям подверглась выборка из 40 СДС, что составляет 10 % всего комплекса «КРАБ». На основе этой выборки можно уверенно сделать заключение, что принципиально аппаратура в виде отдельных СДС может работать в пределах технических параметров ТЗ и соответствовать зарубежным аналогам. Однако по результатам постановок на двух линейных профилях с активным источником были получены сейсмические данные недостаточного качества с точки зрения производственных сейсмических работ. Прежде всего на качестве данных отрицательно отразилось положение, которое заняли СДС на дне. Работа с СПУ не позволила реализовать это условие, в результате при постановке станций на двух профилях процент брака сейсмического материала в среднем составлял 25 %.

В целом комплекс не готов не только к промышленным, но и к натурным испытаниям и нуждается в доработке, которая должна состоять в следующем:

- проведение тщательной юстировки компаса и наклониметров;
- увеличение памяти для сбора данных об азимуте, крене и дифференте станций для последующей фильтрации случайных наблюдений;
- уменьшение излишней чувствительности гидрофонов в 6–8 раз;
- разработка нового комплекса СПУ и метода его использования;
- программная часть КЛ нуждается в доработке для обслуживания всего комплекса 400 СДС.

После устранения указанных недостатков система КРАБ должна быть подвергнута натурным испытаниям в полном объеме.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема 0149-2019-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ампилов Ю. П. Сейсморазведка. Время действий или упущенных возможностей? / Ю. П. Ампилов, М. Ю. Токарев // Бурение и нефть. — 2017. — № 3. — С. 3–13.
2. Ampilov Y. P. Broadband marine seismic acquisition technologies: Challenges and opportunities / Y. P. Ampilov, M. L. Vladov, M.Y. Tokarev // Seismic Instruments. — 2019. — Vol. 55. — Is. 4. — Pp. 388–403. DOI: 10.3103/S0747923919040030.
3. Monk D. J. Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine, and In-between in Light of New Technology and Techniques / D. J. Monk. — Society of Exploration Geophysicists, 2020. — 214 p. DOI: 10.1190/1.9781560803713.
4. Ильинский Д. А. Инновационный подход и мобильная технология реализации сейсморазведки в приливно-отливной зоне в труднодоступных районах Арктики / Д. А. Ильинский [и др.] // Сейсмические приборы. — 2013. — Т. 49. — № 2. — С. 58–70.
5. Лаверов Н. П. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации / Н. П. Лаверов [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2011. — № 4 (4). — С. 004–013.
6. Ray A. First nodal OBS acquisition from the Thunder Horse Field in the deep water of the Gulf of Mexico / A. Ray, B. Nolte, D. Herron // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2004. — Society of Exploration Geophysicists, 2004. — Pp. 406–409. DOI: 10.1190/1.1851281.
7. Behm M. Passive Processing of Active Nodal Seismic Data: Estimation of V_p/V_s Ratios to Characterize Structure and Hydrology of an Alpine Valley Infill / M. Behm, F. Cheng, A. Patterson, G. S. Soreghan // Solid Earth. — 2019. — Is. 10. — Pp. 1337–1354. DOI: 10.5194/se-10-1337-2019.
8. Крутов А. Л. ООО «СИ Технолоджи» – новации, достижения, внедрение / А. Л. Крутов, И. В. Леонтьев // Нефть. Газ. Новации. — 2019. — № 9 (226). — С. 75–79.
9. Костюченко С. Л. К 50-летию юбилею деятельности Центра ГЕОН / С. Л. Костюченко [и др.] // Разведка и охрана недр. — 2018. — № 2. — С. 28–37.
10. Казанин Г. С. Результаты испытаний отечественных 4-компонентных автономных донных станций «КМС» в юго-восточной части Баренцева моря / Г. С. Казанин [и др.] // Материалы VI Международной конференции молодых ученых и специалистов «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового Океана», посвященная 70-летию основания НИИГА — ВНИИОкеангеология / Отв. ред. А. С. Бич. — СПб.: ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2018. — С. 29–30.
11. Ильинский Д. А. Геофизические технологии для изучения процессов образования глубинной нефти / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.
12. Бадиков А. Н. Источник упругих волн для сейсморазведки на предельном мелководье и в транзитных зонах / А. Н. Бадиков, В. И. Гуленко // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2009. — Т. 29. — № 3. — С. 24–26.

REFERENCES

1. Ampilov, Ju., and M. Tokarev. “Seismic survey. Time for action or missed opportunities?.” *Burenie i nefi* 3 (2017): 3–13.
2. Ampilov, Yu P., M. L. Vladov, and M. Yu Tokarev. “Broadband marine seismic acquisition technologies: Challenges and opportunities.” *Seismic Instruments* 55.4 (2019): 388–403. DOI: 10.3103/S0747923919040030.
3. Monk, David J. *Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine, and In-between in Light of New Technology and Techniques*. Society of Exploration Geophysicists, 2020.
4. Ilinski, D. A., A. U. Razumov, A. A. Korneev, A. M. Rusalina, and I. A. Gotz. “Application of new approach and mobile technology for offshore seismic acquisition project in the remote arctic transition areas.” *Seismic Instruments* 49.2 (2013): 58–70.
5. Laverov, N. P., Yu. V. Roslov, L. I. Lobkovskii, A. V. Tulupov, Voronov, and O. Yu. Ganzha. “Perspektivy donnoi seismorazvedki v Rossiiskoi Federatsii.” *Arktika: ekologiya i ekonomika* 4(4) (2011): 004–013.
6. Ray, Amal, Bertram Nolte, and Don Herron. “First nodal OBS acquisition from the Thunder Horse Field in the deep water of the Gulf of Mexico.” *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2004*. Society of Exploration Geophysicists, 2004. 406–409. DOI: 10.1190/1.1851281.

7. Behm, Michael, Feng Cheng, Anna Patterson, and Gerilyn S. Soreghan. "Passive Processing of Active Nodal Seismic Data: Estimation of V_p/V_s Ratios to Characterize Structure and Hydrology of an Alpine Valley Infill." *Solid Earth* 10 (2019): 1337–1354. DOI: 10.5194/se-10-1337-2019.

8. Krutov, A. L., and I. V. Leontiev. "OOO SI Technology: Innovations, Achievements and Application." *Oil. Gaz. Novation* 9(226) (2019): 75–79.

9. Kostyuchenko, S. L., A. V. Mauhin, I. N. Kadurin, V. V. Nedyadko, V. A. Rakitov, Yu. G. Chernyshev. "To the 50-th anniversary of the activities of the GEON Center." *Prospect and protection of mineral resources* 2 (2018): 28–37.

10. Kazanin, G. S., S. O. Bazilevich, A. V. Zimovskii, I. A. Matveev, D. G. Kuoma, D. A. Il'inskii, K. A. Roginskii, and O. Yu. Ganzha. "Rezultaty ispytaniy otechestvennykh 4-komponentnykh avtonomnykh donnykh stantsii "KMS" v yugo-vostochnoi chasti Barentseva moray." *Materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Novoe v geologii i geofizike Arktiki, Antarktiki i Mirovogo Okeana», posvyashchennaya 70-letiyu osnovaniya NIIGA – VNIIOkeangeologiya*. Edited by A. S. Bich. SPb.: FGBU «VNIIOkeangeologiya», 2018. 29–30.

11. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Geophysical technologies for study of deep oil genesis." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.

12. Badikov, A. N., and V. I. Gulenko. "Istochnik uprugikh voln dlya seismorazvedki na predel'nom melkovod'e i v tranzitnykh zonakh." *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki* 29.3 (2009): 24–26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильинский Дмитрий Анатольевич —
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук
117997, Российская Федерация, г. Москва,
Нахимовский проспект, 36
e-mail: dilinskiy61@mail.ru
Рогинский Константин Александрович —
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук
117997, Российская Федерация, г. Москва,
Нахимовский проспект, 36
e-mail: roginskiy@list.ru
Ганжа Олег Юрьевич —
главный специалист
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт океанологии им. П. П. Ширшова
Российской академии наук
117997, Российская Федерация, г. Москва,
Нахимовский проспект, 36
e-mail: ganzhaoy@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilinskiy, Dmitry A. —
PhD,
Senior Research Scientist
P. P. Shirshov Institute
of Oceanology of Russian
Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospekt,
Moscow, 117997,
Russian Federation
e-mail: dilinskiy61@mail.ru
Roginskiy, Konstantin A. —
PhD,
Senior Research Scientist
P. P. Shirshov Institute
of Oceanology of Russian
Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospekt,
Moscow, 117997,
Russian Federation
e-mail: roginskiy@list.ru
Ganzha, Oleg Y. —
Chief Specialist
P. P. Shirshov Institute
of Oceanology of Russian
Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospekt,
Moscow, 117997,
Russian Federation
e-mail: ganzhaoy@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2020 г.
Received: February 11, 2020.

IMPROVING THE HYDROGRAPHIC SURVEY EFFICIENCY IN THE NORTHERN SEA ROUTE WATER AREA

A. B. Afonin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The development of a scheme for surveying the bottom relief in the water area of the Northern Sea Route, the use of which provides its efficiency increase, is described in the paper. It is concluded that the nature and trajectories of ship movement in the winter navigation period in the Central and Eastern sectors of the Arctic will have similar features to the nature and trajectories of ship movement in the Kara Sea. The main navigational features of the Central and Eastern part of the Northern Sea Route are presented. The main factors that determine navigation conditions in the Central and Eastern part of the Northern Sea Route are highlighted. Estimates of the areas of shallow water regions in the Central and Eastern parts of the Northern Sea Route are given. It is emphasized that within these waters there are significant areas with insufficient hydrographic knowledge to ensure the safe navigation of large-tonnage vessels. Hydrographic conditions for safe navigation of vessels with a given draft are formulated. The time required for surveying the bottom relief of the Northern Sea Route water areas, which currently have insufficient hydrographic knowledge is estimated. It is concluded that it is necessary to develop such a scheme for performing the survey of the bottom relief, which would significantly improve its performance. The main principles on which the proposed scheme is based are given. It is emphasized that in order to ensure safe navigation of a vessel with a given draft, the bottom relief model must provide a given level of uncertainty of the surface at a given depth, and not to the bottom. It is proposed to perform a survey of the bottom topography with the use of multi-beam echo sounders on parallel lines that have no intersections. The proposed scheme is compared with traditional schemes for surveying the bottom relief: a single-beam echo sounder and a multi-beam echo sounder with overlapping adjacent survey bands. The conclusion on the advantage of the proposed scheme in terms of increasing the labor productivity when performing the survey of the bottom relief and increasing its efficiency is made.

Keywords: Northern Sea Route, safety of navigation, hydrographic conditions of safe navigation, hydrographic reserve, uncertainty of the bottom relief model, hydrographic knowledge.

For citation:

Afonin, Andrej B. "Improving the hydrographic survey efficiency in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 302–309. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-302-309.

УДК 528.47

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЪЕМКИ РЕЛЬЕФА ДНА В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

А. Б. Афонин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена разработке схемы выполнения съемки рельефа дна в акватории Северного морского пути, применение которой обеспечивает повышение ее эффективности. Сделан вывод о том, что характер и траектории движения судов в зимний период навигации в центральном и восточном секторах Арктики будет иметь похожие черты с характером и траекториями движения судов в Карском море. Приводятся основные навигационные особенности центральной и восточной части акватории Северного морского пути. Выделены основные факторы, определяющие навигационные условия в центральной и восточной части акватории Северного морского пути. Приводятся оценки площадей мелководных районов акватории центральной и восточной частей акватории Северного морского пути. Отмечается, что в пределах этих акваторий находятся значительные по площади районы, имеющие недостаточную гидрографическую изученность. Формулируются гидрографические условия безопасной навигации судов с заданной

осадкой. Оценивается время, необходимое для выполнения съемки рельефа дна акваторий Северного морского пути, которые на сегодняшний день имеют недостаточную гидрографическую изученность. Сделан вывод о необходимости разработки такой схемы выполнения съемки рельефа дна, которая бы позволила значительно повысить её производительность. Приведены основные принципы, на которых основана предлагаемая схема. Подчеркивается, что для обеспечения безопасной навигации судна с заданной осадкой модель рельефа дна должна обеспечивать заданный уровень неопределенности поверхности на заданной глубине, а не до дна. Предлагается выполнять съемку рельефа дна с применением многолучевых эхолотов по параллельным полосам, не имеющим пересечений. Приводится сравнение предлагаемой схемы с традиционными схемами съемки рельефа дна: однолучевым и многолучевым эхолотами с перекрытием смежных полос обследования. Сделан вывод о преимуществе предложенной схемы в части повышения производительности труда при выполнении съемки рельефа дна и повышения ее эффективности.

Ключевые слова: Северный морской путь, безопасность плавания, гидрографические условия безопасной навигации, гидрографический запас, неопределённость модели рельефа дна, гидрографическая изученность.

Для цитирования:

Афонин А. Б. Повышения эффективности съемки рельефа дна в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 302–309. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-302-309.

Введение (Introduction)

Превращение Северного морского пути (СМП) в постоянно действующую круглогодичную транспортную магистраль [1] неизбежно ведет к существенным изменениям в маршрутах плавания судов в пределах акватории СМП. Конкретные маршруты плавания будут формироваться практически в реальном времени в зависимости от текущих ледовых условий. Наличие тяжелых льдов в акватории, особенно в зимний период навигации, обуславливает необходимость оперативного выбора оптимального маршрута плавания, минимизирующего ледовую нагрузку на судно. В практическом плане это проявляется как отклонения реальных маршрутов движения судов от рекомендованных трасс [2], причем не только прибрежных, но и транзитных [3]. Такая картина наблюдается в настоящее время в Карском море, где реализована круглогодичная навигация. Отклонения реальных маршрутов судов в сторону от рекомендованных трасс в Карском море, особенно в зимний период навигации, достигают десятков миль [4].

Зимняя навигация в центральном и восточном секторах Арктики, по всей вероятности, будет выполняться по аналогичным «сценариям» и в этих акваториях также следует ожидать значительные отклонения реальных маршрутов судов в сторону от рекомендованных трасс. Однако, в отличие Карского моря, моря центрального и восточного секторов Арктики имеют более сложные гидрографические условия навигации. Сложность гидрографических условий навигации в этих районах определяется, главным образом, двумя обстоятельствами.

Во-первых, это обширные по площади мелководья. Доля площадей мелководных районов арктических морей центрального и восточного сектора с глубинами, не превышающими 30 м, составляет [2]:

- Море Лаптевых — 71 %;
- Восточно-Сибирское море — 86 %;
- Чукотское море — около 7 %.

В абсолютном суммарном выражении площадь мелководья оценивается величиной порядка 1500 тыс. км². Фактор мелководья арктических морей не играет существенной роли для судов, имеющих осадку 5–6 м. Рекомендованные трассы СМП, сформированные для таких судов с начала 30-х гг. XX в., обеспечивают их безопасное плавание. В течение последнего десятилетия в акватории СМП началась эксплуатация крупнотоннажных судов, имеющих осадку 12–15 м [5]. Применение таких судов обусловлено коммерческой целесообразностью вывоза значительных объемов углеводородов с имеющихся и прогнозируемых месторождений арктического шельфа, расположенных, в том числе, и в зоне арктического мелководья центрального и восточного секторов Арктики [6].

Мелководье акватории приводит к сужению области безопасного плавания и маневрирования крупнотоннажных судов, что создает для них более сложные условия навигации по сравнению с условиями навигации для судов с меньшей осадкой в этих же районах.

Во-вторых, недостаточная гидрографическая изученность отдельных районов акватории СМП, лежащих вне рекомендованных трасс, вплоть до наличия «белых» пятен [5]. Данное обстоятельство на фоне мелководья делает в этих районах условия навигации еще более сложными. Доля площадей акваторий арктических морей, имеющих недостаточную гидрографическую изученность, составляет [7]:

- Карское море — 18 %;
- Море Лаптевых — 15 %;
- Восточно-Сибирское море — 51 %;
- Чукотское море — около 40 %.

В абсолютном суммарном выражении площадь районов, имеющих недостаточную гидрографическую изученность, оценивается значением порядка 970 тыс. км². Реализация круглогодичной навигации в центральной и восточной частях акватории СМП потребует вовлечение этих малоизученных районов в общую структуру маршрутов транспортировки грузов по СМП. Скорейшее решение этой задачи обуславливает необходимость выполнения подробных гидрографических исследований в ближайшее время в максимально короткие сроки и на огромных площадях.

В соответствии с существующими регламентами [8], [9] мелководные районы акватории СМП, через которые будут проходить маршруты плавания крупнотоннажных судов, следует отнести к районам, имеющим важное навигационное значение и обеспечивающим лишь минимальные запасы воды под килем. Поэтому в этих районах необходимо выполнение детальной съемки рельефа дна способом площадного обследования [10]. Выбранное междугалсовое расстояние при этом способе съемки должно практически гарантировать взаимное пересечение смежных полос обследования дна. По оценке автора данной публикации, выполнение одним судном площадной съемки рельефа дна акватории площадью в 970 тыс. км² с пересечением смежных полос обследования потребует примерно 270 лет. Сокращение этого срока возможно путем повышения производительности съемки рельефа дна при сохранении необходимого уровня безопасности мореплавания.

Впервые задача повышения производительности гидрографической съемки была сформулирована в работе [11]. Ее решение достигается за счет *метода выполнения площадной съемки по полосам обследования дна, отстоящим друг от друга на некоторой дистанции*, которую предлагается определять в зависимости от глубины района, заданной осадки судна и постоянного для всех трасс СМП коэффициента. Данный коэффициент связывает горизонтальный и вертикальный размеры поднятий дна над фоновыми глубинами, которые могут оказаться между полосами обследования [12]. В этой работе предложена формула, позволяющая вычислить величину интервала между полосами площадного обследования дна. Наличие интервалов между полосами обследования увеличивает дискретность съемки, повышая ее производительность, с сохранением при этом достаточного уровня безопасности плавания судов с заданной осадкой. Выполнение съемки рельефа дна с помощью предложенного метода сокращает до 190 лет время обследования площади, равной 970 тыс. км².

Предложенная в работе [12] методика вычисления интервала между полосами обследования не кажется оптимальной, поскольку базируется на общем для всех трасс СМП значении коэффициента связи между горизонтальными и вертикальными размерами возвышенностей и тем самым не учитывает локальные морфологические и морфометрические характеристики рельефа дна. Неопределенность поверхности рельефа дна между полосами обследования в данном случае, по существу, постоянна и никак не связана с локальными особенностями рельефа дна в конкретном районе. Данные о рельефе дна, полученные по измерениям глубин в пределах полос обследования, вообще не участвуют в определении подробности съемки.

Использование характеристик рельефа дна в пределах полос обследования для оперативного определения дискретности съемки «по полосам», содержит значительный потенциал оптимизации процесса съемки, максимально повышающий ее производительность.

Целью настоящего исследования является разработка метода выполнения гидрографической съемки, который позволит повысить ее производительность, обеспечив в минимальные сроки безопасное плавание транспортных судов по всей акватории СМП.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Метод выполнения гидрографической съемки на акватории СМП основан на формализации задачи с применением теории вероятностей, теории геометрических вероятностей, математической статистики и теории случайных функций. Данный метод предполагает выполнение площадного обследования рельефа дна «по полосам», отстоящим друг от друга на некоторой дистанции и оценку неопределенности рельефа дна, возникающую в пределах необследованных участков между полосами. Оценка неопределенности поверхности рельефа дна должна показывать с заданной доверительной вероятностью значения минимально возможных глубин между полосами обследования.

Последнее утверждение свидетельствует о том, что в отличие от стандарта [8], содержащего требование о полном обследовании дна на мелководье, которое позволяет обнаружить на дне, в том числе кубические объекты заданных размеров, в рассматриваемом случае ставится менее строгое условие. В данном случае в результате съемки должна с заданной вероятностью появиться уверенность не в наличии или отсутствии на дне объектов определенных размеров, а в отсутствии поднятий дна, глубина над которыми меньше, чем оценка минимальной глубины, полученной на основе результатов съемки.

Оценка неопределенности рельефа дна между полосами обследования формируется на основе статистического анализа морфологических и морфометрических характеристик рельефа дна, полученных по значениям глубин, измеренных внутри полос обследования. Высокая плотность измерений глубин в пределах полосы обследования позволяет определить морфологические свойства рельефа дна и вычислить его морфометрические и статистические характеристики, необходимые для прогнозирования и вероятностной оценки значений глубин между полосами обследования. Это свойство площадной съемки делает принципиально возможным из множества существующих методов прогноза значений глубин в пределах необследованных участков сделать обоснованный выбор такого метода, который показывает минимальную неопределенность в данных условиях.

В общем случае величина неопределенности глубины пропорциональна величине междугалсового расстояния: большим значениям междугалсового расстояния соответствуют большие значения неопределенности значения прогнозируемой глубины [12]. Вместе с тем неопределенность значения глубины зависит от вероятностных и статистических характеристик рельефа при одном и том же значении междугалсового расстояния [13].

Результаты площадной съемки по полосам, отстоящим друг от друга на некотором расстоянии L , формируют множество значений неопределенности глубин между полосами $\{\Delta\}$. Элементами этого множества являются конкретные значения неопределенности глубин, обусловленные применением различных статистических и вероятностных способов оценок глубин в промежутке между полосами обследования:

$$\{\Delta\} = \{\Delta_i(I_i; p; L; M_i)\}, \quad (1)$$

где $\{\Delta_i\}$ — неопределенность, обусловленная применением i -го способа оценки, $i = [1 - n]$;

n — общее количество способов оценки глубин между полосами;

I_i — i -й способ оценки глубин;

p — доверительная вероятность неопределенности Δ_i , $p = \text{const}$ для всех способов оценки неопределенности;

L — междугалсовое расстояние, $L = \text{const}$;

M_i — подмножество статистических, вероятностных, морфологических и морфометрических характеристик рельефа дна, используемых для оценки глубин i -м способом.

Статистические, вероятностные, морфологические и морфометрические характеристики рельефа дна, полученные по измерениям в пределах полос обследования, являются исходными данными для применения различных способов оценки неопределенности глубин между полосами и в силу этого, в зависимости от применяемого способа, получаются различные значения $\{\Delta_i\}$.

Результаты (Results)

При планировании съемки рельефа дна величину междугалсового расстояния предлагается определять в виде решения относительно L следующего уравнения:

$$\min\{\Delta\} = \min\{\Delta_i(I_i; p; L; M_i)\} = Z_I - (d + \delta_{\min}), \quad (2)$$

где $\min\{\Delta\} = \min\{\Delta_i(I_i; p; L; M_i)\}$ — минимальный элемент множества (1);

Z_I — оценка глубины способом I_i в промежутке между полосами обследования;

d — осадка судна;

$\delta_{\min}$ — минимальный запас воды под килем.

Минимальный элемент множества (1) определяет наилучший способ оценки неопределенности по критерию минимума значения Δ_i . Это позволяет вычислить максимально допустимую величину междугалсового расстояния $L = L_{\max}$, которая соответствует максимально редкой сети галсов, обеспечивая, однако, заданный уровень безопасности плавания.

Максимальное значение междугалсового расстояния обеспечивает также максимальную производительность выполнения съемки. В качестве примера выполним сравнение оценок неопределенности поверхности рельефа дна в промежутках между полосами обследования, полученных с использованием различных гипотез о морфометрических характеристиках рельефа. Первая гипотеза заключается в том, что коэффициент, связывающий вертикальные и горизонтальные размеры поднятий дна в пределах арктического шельфа, равен 8,7 [11]. В соответствии со второй гипотезой этот же коэффициент принимается равным 62,5 [14]. И в первом и во втором случае значения коэффициентов представляют собой интегральные морфометрические характеристики рельефа дна шельфа арктических морей. Существенное различие между ними объясняется различными исходными представлениями о характере рельефа и методами их определения.

При равных значениях междугалсовых расстояний, оценка неопределенности поверхности рельефа между полосами обследования, основанная на первой гипотезе более, чем в семь раз превосходит эту же оценку, основанную на второй гипотезе. Данное обстоятельство позволяет, опираясь на вторую гипотезу, увеличить практически в семь раз междугалсовое расстояние без ущерба для обеспечения безопасного плавания судов. В этом случае покрытие 970 тыс. км² площадью съемкой одним судном потребует периода времени, равного примерно 40 лет, а не 190 лет, как в случае оценки неопределенности поверхности рельефа между полосами обследования, основанной на первой гипотезе.

Обсуждение (Discussion)

Метод выполнения съемки и определения максимальной ее дискретности базируется на определении статистических характеристик рельефа, полученных по измерениям глубин внутри полос обследования и на переносе этих оценок рельефа в пределы необследованных участков между полосами. Это является его недостатком, однако наличие практически непрерывного площадного покрытия внутри полос обследования позволит определить районы акватории, имеющие однородные статистические и вероятностные характеристики глубин. В этих районах перенос оценок характеристик рельефа в необследованные области можно считать вполне обоснованным.

Применение данного метода потребует выполнения большого объема вычислений для получения практически в реальном времени статистических и вероятностных характеристик рельефа дна в пределах обследованных полос, что вызовет необходимость разработки специального программного обеспечения.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный метод выполнения съемки рельефа дна позволяет существенно увеличить производительность гидрографических работ в акватории СМП и сократить сроки покрытия малообследованных районов акватории СМП до 30–40 лет силами одного гидрографического судна. Десять судов справятся с этой задачей за три-четыре навигации.
2. Предложенная схема может использоваться как основная для обследования значительных по площади мелководных районов акватории СМП, имеющих недостаточную гидрографическую изученность.
3. Определение величины междугалсового расстояния по формуле (2) позволит формализовать процесс управления качеством съемки как на этапе планирования, так и на этапе ее выполнения.
4. Входными данными, обеспечивающими процесс управления качеством, является глубина и предельная осадка судна, плавание которого предполагается в данном районе, а также статистические и вероятностные характеристики рельефа, выходными данными — оперативно вычисленное значение междугалсового расстояния.
5. На этапе планирования оценка величины междугалсового расстояния выполняется по имеющимся материалам гидрографической изученности района. На этапе выполнения съемки величина междугалсового расстояния может оперативно корректироваться в зависимости от результатов выполненных измерений.
6. В предлагаемом исследовании формируются основы для создания динамических измерительных сетей, которые, с одной стороны, обладают максимально допустимой дискретностью измерений, а с другой — обеспечивают с заданной вероятностью безопасную навигацию судов.
7. Дальнейшее направление исследований состоит в разработке конкретных методик определения подробности съемки, обеспечивающей заданный уровень неопределенности модели рельефа дна на заданной глубине и обосновании выбора направления галсов основного покрытия и контрольных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олерский В. Комплексный проект развития Северного морского пути / В. Олерский // Транспортная стратегия — XXI век. — 2015. — № 29 (2). — С. 8–9.
2. Афонин А. Б. Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
3. Рукша В. В. Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы / В. В. Рукша [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4 (20). — С. 104–110.
4. Ольховик Е. О. Влияние льда на формирование судоходных маршрутов в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик, Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 26–36. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-26-36.
5. Андреева Е. В. Обоснование выбора количественных показателей зон маневрирования в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 951–959. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-951-959.
6. Каминский В. Д. Основные проблемы и пути освоения углеводородных ресурсов на шельфе Арктической зоны Российской Федерации / В. Д. Каминский [и др.] // Деловой журнал Neftegaz.RU. — 2018. — № 9. — С. 44–46.
7. Афонин А. Б. Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.

8. IHO Standards for Hydrographic Surveys. — 5th Edition. — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. — 28 p.
9. A guide to the requirements and processes necessary to produce ENC's Special Publication No. 65. — Edition 1.1. — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. — 61 p.
10. Решетняк С. В. Гидрографическая изученность подводного рельефа арктических морей России / С. В. Решетняк // Геодезия и картография. — 2006. — № 4. — С. 57–60.
11. Решетняк С. В. Метод повышения эффективности гидрографического обследования высокоширотных трасс Северного морского пути / С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков // Геодезия и картография. — 2011. — № 6. — С. 45–49.
12. Решетняк С. В. Северный морской путь. Численная оценка гидрографической обеспеченности трасс для судов с большой осадкой / С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков // Геодезия и картография. — 2008. — № 6. — С. 59–61.
13. Сорокин А. И. Гидрографические исследования Мирового океана / А. И. Сорокин. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 286 с.
14. Королёв И. Ю. Оценка допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы / И. Ю. Королёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.

REFERENCES

1. Olerskii, V. "Kompleksnyi projekt razvitiya Severnogo morskogo puti." *Transportnaya strategiya - XXI vek* 29(2) (2015): 8–9.
2. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezikov. "The concept of development of shipping routes along the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
3. Ruksha, V. V., M. S. Belkin, A. A. Smirnov, and V. G. Arutyunyan. "Structure and dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route: the history, present and prospects." *Arctic: ecology and economy* 4(20) (2015): 104–110.
4. Olkhovik, Evgeniy Olegovich, Ekaterina Valerievna Andreeva, and Aleksandr Lvovich Tezikov. "Ice influence on forming shipping routes in the water area of the Northern Sea Route." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: marine engineering and technologies* 2 (2019): 26–36. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-26-36.
5. Andreeva, Ekaterina V., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. "The rationale for the selection of quantitative indicators zones of maneuvering in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 951–959. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-951-959.
6. Kaminskii, V. D., O. I. Suprunenko, T. Yu. Medvedeva, and A. A. Chernykh. "Osnovnye problemy i puti osvoeniya uglevodorodnykh resursov na shel'fe Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii." *Delovoi zhurnal Neftegaz. RU* 9 (2018): 44–46.
7. Afonin, Andrej B. "A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
8. IHO Standards for Hydrographic Surveys. 5th Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.
9. A guide to the requirements and processes necessary to produce ENC's Special Publication No. 65. Edition 1.1. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.
10. Reshetnyak, S. V. "Hydrographic study of the Arctic seas underwater relief of Russia." *Geodesy and Cartography* 4 (2006): 57–60.
11. Reshetnyak, S. V., and A. L. Tesikov. "Efficiency increasing method of hydrographic survey of Northern Sea Route highlatitude paths." *Geodesy and Cartography* 6 (2011): 45–49.
12. Reshetnyak, S. V., and A. L. Tesikov. "Northern seaway. Numerical evaluation of the hydrographic provision of routes for the high draught vessels." *Geodesy and Cartography* 6 (2008): 59–61.
13. Sorokin, A. I. *Gidrograficheskie issledovaniya Mirovogo okeana*. L.: Gidrometeizdat, 1980.
14. Korolev, Ivan Jurevich. "Evaluation of the tolerance path of the vessel from the surveyed strip." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Афонин Андрей Борисович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: andrey.afonin.gma@yandex.ru,
AfoninAB@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Afonin, Andrej B. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: andrey.afonin.gma@yandex.ru,
AfoninAB@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 27 февраля 2020 г.
Received: February 27, 2020.*

METHODS FOR DETERMINING THE DISTANCES OF SUSPENDED PARTICLES SEDIMENTATION DURING DREDGING OPERATIONS ON NAVIGABLE RIVERS

A. P. Afanas'ev¹, I. V. Kachanov², I. M. Shatalov²

¹ — Belsudoproekt, OJSC, Gomel, Republic of Belarus

² — Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

The methods for calculating the distances of suspended particles sedimentation to the bottom during dredging on watercourses (rivers and canals) of the Republic of Belarus, which allow you to determine the boundaries of the zones of harmful effects of working pump dredgers, are provided in the paper. It is well known that suspended particles are formed both naturally in spring and during rain floods, and under a variety of anthropogenic factors, namely, during bridges construction, the laying of oil and gas pipelines, palification, dams construction, and dredging. In all cases, zones of increased turbidity both short-term and long-period, sometimes constant are formed. In this case, suspensions differ in concentration, structure of suspended particles, duration of deposition, and the degree of negative impact on living organisms, although the general nature of their effects is the same. During the operation of pump dredgers on large and medium watercourses in the Republic of Belarus, intensive weighing the soil particles that form the watercourse channel, which has a harmful effect on the objects of the animal world and their habitat, takes place. Compensation payments are provided for the ichthyofauna death, a decrease in its number and productivity due to loss or disturbance of the habitat through dredging at water bodies, in accordance with the "Regulation on the procedure for determining the amount of compensation payments and their implementation". The methods proposed in the paper can be used in engineering calculations of the size of the zones of harmful effects. Moreover, the choice of a particular technique depends on the type of watercourse and its main geometric and hydrodynamic parameters, the availability of reliable initial data, particle size distribution of the suspension, climatic factors, etc. The sequence of using the methods must necessarily be consistent with the type of watercourse, its basic geometric and hydrodynamic parameters, the particle size distribution of the suspension and its hydraulic size and climatic factors.

Keywords: soil particles, particle size distribution, suspension flow, hydraulic size, flow turbidity, non-siltation speed, roughness coefficient.

For citation:

Afanas'ev, Aleksei P., Igor' V. Kachanov, and Igor' M. Shatalov. "Methods for determining the distances of suspended particles sedimentation during dredging operations on navigable rivers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.2 (2020): 310–322. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-310-322.

УДК 627.8-1

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ ОСАЖДЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТАХ НА СУДОХОДНЫХ РЕКАХ

А. П. Афанасьев¹, И. В. Качанов², И. М. Шаталов²

¹ — ОАО «Белсудопроект», г. Гомель, Республика Беларусь

² — УО «Белорусский национальный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь

В статье приводятся методики расчета расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь, которые позволяют определять границы зон вредного воздействия работающих землесосных снарядов. Общеизвестно, что взвешенные частицы образуются как естественным путем — в весенний период и при дождевых паводках, так и при воздействии разнообразных антропогенных факторов — при строительстве мостов,

прокладке нефте- и газопроводов, забивке свай, устройстве дамб, проведении дноуглубительных работ. Во всех случаях образуются зоны повышенной мутности как кратковременные, так и длительнопериодические, иногда постоянные. При этом взвеси различаются по концентрации, структуре взвешенных частиц, длительности осаждения и степени негативного влияния на живые организмы, хотя общий характер их воздействий однотипен. При эксплуатации землесосных снарядов на больших и средних водотоках в Республике Беларусь происходит интенсивное взвешивание частиц грунта, слагающих русло водотока, которое оказывает вредное влияние на объекты животного мира и среду их обитания. За гибель ихтиофауны, снижение ее численности и продуктивности при утрате или нарушении среды обитания, вследствие проведения дноуглубительных работ на водных объектах, предусмотрены компенсационные выплаты в соответствии с «Положением о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществлении». Предлагаемые в статье методики могут использоваться в инженерных расчетах размеров зон вредного воздействия, причём выбор той или иной методики зависит от вида водотока и его основных геометрических и гидродинамических параметров, наличия достоверных исходных данных, гранулометрического состава взвеси, климатических факторов и т. д. Очередность использования методик должна обязательно быть согласована с типом водотока, его основными геометрическими и гидродинамическими параметрами, с гранулометрическим составом взвеси и его гидравлической крупностью и климатическими факторами.

Ключевые слова: частицы грунта, гранулометрический состав, взвесенесущий поток, гидравлическая крупность, мутность потока, незаиляющая скорость, коэффициент шероховатости.

Для цитирования:

Афанасьев А. П. Методики определения расстояний осаждения взвешенных частиц при дноуглубительных работах на судоходных реках / А. П. Афанасьев, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 310–322. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-310-322.

Введение (Introduction)

В Республике Беларусь на больших и средних водотоках (реках и каналах) постоянно проводятся дноуглубительные работы с целью организации бесперебойного движения водного транспорта и работы по добыче сыпучих строительных материалов (песка, гравия и т. д.). Ранее указанные работы связаны с постоянной эксплуатацией землесосных снарядов (земснарядов). При работе земснарядов (особенно при их включении) происходит интенсивное взвешивание частиц грунта, слагающих русло водотока [1], [2]. Далее взвешенные частицы переносятся потоком воды вниз по течению водотока (реки или канала), оказывая вредное воздействие на объекты животного мира и среду их обитания [3]. За гибель ихтиофауны, снижение ее численности и продуктивности (прироста) при утрате или нарушении среды обитания вследствие проведения дноуглубительных работ на водных объектах предусмотрены компенсационные выплаты в соответствии с «Положением о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществлении» (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 7.02.2008 г. № 168) [10].

Размер компенсационных выплат зависит (в том числе) от размеров зон вредного воздействия землесосного снаряда. Для определения размеров зон вредного воздействия необходимо в первую очередь рассчитать расстояние, на котором будут выпадать на дно взвешенные частицы от места расположения земснаряда. С этой целью в настоящей статье был выполнен анализ современной научно-технической литературы по вопросам транспортирующей способности взвесенесущих потоков и разработаны три методики расчета расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь. В предлагаемой статье выполнено исследование пространственно-трехмерной модели транспорта и осаждения взвеси в прибрежной зоне с учетом изменения рельефа дна [4], [5]. Модель учитывает следующие процессы: адвективный перенос, обусловленный движением водной среды, турбулентный массоперенос и диффузию, гравитационное осаждение частиц взвеси, а также изменение геометрии дна, вызванное осаждением частиц взвеси или подъемом частиц донных отложений. Данная модель может представлять ценность при прогнозе распространения загрязнений и изменения рельефа дна как при антропогенном воздействии, так и в силу естественно протекающих природных процессов в прибрежной зоне.

Каждая из трех методик может быть использована для любых водотоков Республики Беларусь при определенных параметрах этих водотоков, гранулометрического состава взвеси в русле водотока, скорости движения и глубины потока, гидравлической крупности частиц грунта и т. д. и режимов работы земснарядов. Причем первая методика применима в пределах графоаналитического решения системы уравнений турбулентного массопереноса и диффузии с конечной скоростью и относительной гидравлической крупностью взвешенных частиц в пределах $w_r = 0,1-5,0$ [6]. Вторая методика, разработанная на основе эмпирической теории движения наносов, может использоваться для определения расстояния выпадения на дно одиночных взвешенных частиц и дает, как правило, ориентировочные значения (зачастую значительно завышенные) этих расстояний, так как не учитывает основные характеристики самого русла водотока (его размеры, относительную шероховатость, гидродинамические параметры с учетом сопротивления русла и т. д.) [7]. Третья методика, разработанная на основе теории расчета гравитационных отстойников, неплохо коррелирует с первой методикой и, в случае невозможности ее использования, данная методика может использоваться в качестве основной при определении расстояния выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь [8].

Результаты работы были внедрены в учебном процессе БНТУ, а также на предприятиях водного транспорта Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь: ОАО «Белсудопроект» и РУ Днепр-Двинское ПВП «Белводпуть», а также на участках рек Березина, Сож, Днепр и Неман.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Первая методика была разработана на основе теории турбулентного массопереноса и турбулентной диффузии [6]. При работе земснаряда масса грунтовых частиц взвешивается в водном потоке и перемещается им по течению реки. При использовании данной методики расчеты выявили следующие особенности распределения выпадающих частиц вдоль дна водотока (рис. 1).

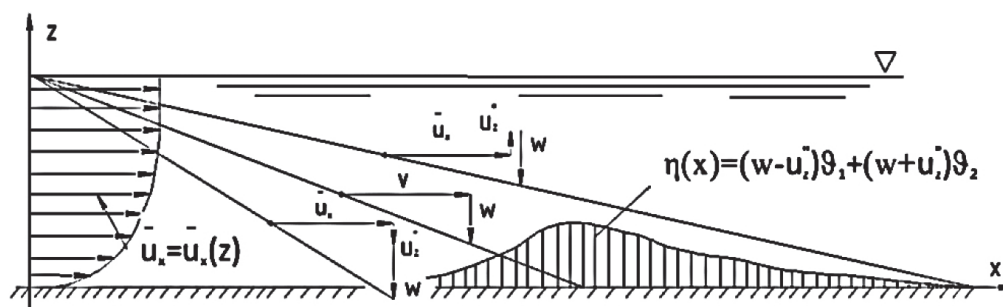


Рис. 1. Схема выпадения твердых частиц на дно русла

1. Частицы с гидравлической крупностью w , поступающие в поток в точке с координатами $x = 0, z = h$, выпадают из потока в интервале:

$$\frac{hv}{u_x'' + w} < x < \frac{hv}{w - u_x''}, \quad (1)$$

где v — средняя скорость жидкости в водотоке, м/с; h — полная глубина потока, м; u_x'' — пульсации скорости, м/с; w — гидравлическая крупность частиц, м/с; x — расстояние выпадения на дно частиц, м.

2. Половина взвешенных частиц выпадет на участке $0 < x < \frac{hv}{w}$.

3. При $w < u_x''$ на дно водотока выпадет лишь та часть твердого весового расхода, на которую он превосходит транспортирующую способность.

4. Как следует из расчетов и качественно подтверждается неравенством (1), чем больше пульсации скорости u_z'' , тем больше должна быть длина, на которой выпадет заданная часть твердого расхода, поступающего в водоток.

Для практических инженерных расчетов предлагается использовать график (рис. 2), основанный на решении системы уравнений диффузии с конечной скоростью (2).

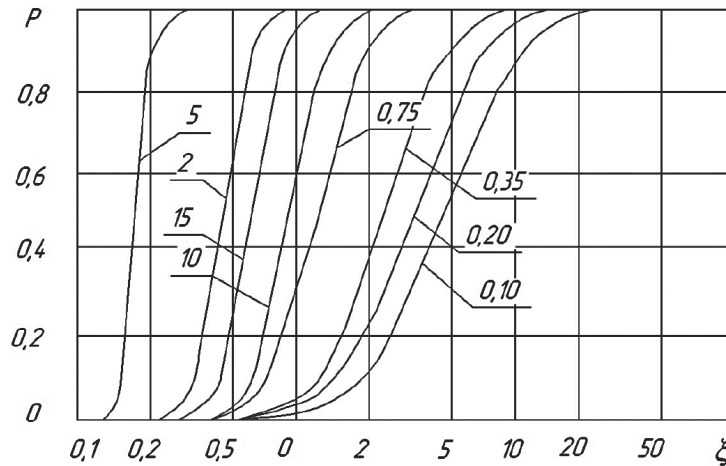


Рис. 2. График для расчета длины выпадения взвешенных частиц на дно водотока

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} + (u_z'' - w) \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z} &= -\omega^{(L)} \vartheta_1 + \omega^{(L)} \vartheta_2; \\ \frac{\partial \vartheta_2}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \vartheta_2}{\partial x} + (u_z'' - w) \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z} &= \omega^{(L)} \vartheta_1 - \omega^{(L)} \vartheta_2; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На рис. 2 по вертикали отложено значение

$$P(\xi) = \int_0^\xi [(w - u_z'') \vartheta_1 + (w + u_z'') \vartheta_2] d\xi, \quad (3)$$

где $P(\xi)$ — часть удельного на единицу ширины потока твердого массового расхода; ξ — безразмерная длина.

По горизонтали на рис. 2 отложена величина

$$\xi = \frac{x \sqrt{g}}{h C}, \quad (4)$$

где C — коэффициент Шези для расчета реки или участка, который при отсутствии данных можно принимать $C = (30-50) \sqrt{\text{м/с}}$ или рассчитывать по формуле Шези:

$$C = \frac{1}{n} R^{1,5\sqrt{n}}, \quad \text{при } R \leq 1,0 \text{ м}; \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1,3\sqrt{n}}, \quad \text{при } R > 1,0 \text{ м}, \quad (6)$$

где n — значение относительного коэффициента шероховатости естественного русла, выбираемое из справочной или технической литературы [8], [9] в зависимости от состояния русла, например, для прямолинейных и чистых не заросших русел $n = 0,025$; для русел в удовлетворительном состоянии (с небольшой растительностью) $n = 0,035$; для русел со значительной растительностью и некоторой кривизной $n = 0,05$; для русел заросших и со значительной извилистостью $n = 0,08-0,1$; $R \approx h$ — гидравлический радиус русла, который может приниматься равным средней глубине потока для широких русел, у которых ширина русла B значительно больше глубины потока h , т. е. $B \gg h$ (данное неравенство справедливо для большинства рек Республики Беларусь).

Однако применение первой методики ограничено возможностями графоаналитического решения системы уравнений турбулентной диффузии с конечной скоростью.

Вторая методика была разработана на основе эмпирической теории движения наносов [7]. Основной характеристикой данной методики, определяющей движение твердых частиц в потоке, является скорость их выпадения в спокойной воде, называемая *гидравлической крупностью фракций* w , которая зависит от формы частиц, их удельного веса, а также от температуры воды, в которой выпадает взвесь. Для того чтобы определить расстояние s , на котором произвольно взятая частица падает на дно, необходимо подобрать переменную t с пределами изменения $-\infty$ и p' , что может быть выражено следующей зависимостью:

$$\frac{w_s}{w_0} = \frac{1}{n} \int_{-\infty}^{p'} e^{-t^2} dt, \quad (7)$$

где W_s — количество наносов, выпавших на дно на участке длиной s , считая от начального сечения; W_0 — количество наносов, проходящих через начальное сечение на высоте y от дна; p' — некоторая расчетная функция, значения которой определяются согласно зависимости

$$p' = 2,74 \frac{\frac{w\sqrt{s}}{u} - \frac{y}{\sqrt{s}}}{\sqrt{h} - 0,2}, \quad (8)$$

где $u = \frac{s}{t}$ — продольная скорость при условии допущения отсутствия ее изменение как по вертикали, так и во времени; h — полная глубина потока; y — высота над дном, на которой проходит частица.

Используя формулу (8), получим

$$s = \frac{(p')^2 u^2 (\sqrt{h} - 0,2)^2}{2,74^2 w^2}. \quad (9)$$

Для приближенного решения данное значение $\frac{w_s}{w_0}$ можно отнести к количеству наносов, отложившихся у дна водотока. Используя данные табл. 1 и уравнение (8), можно установить характер распределения оседающих наносов по длине реки, канала или сооружения, если известны их гидравлическая крупность и распределение мутности по глубине. Проведенный анализ эмпирической теории движения наносов позволил определить основные параметры взвесенесущего потока воды (незаиляющую скорость, мутность потока, гидравлическую крупность и т. д.), его транспортирующую способность, а также расстояния выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта на водотоках Республики Беларусь.

Таблица 1

Значения p' и $\frac{w_s}{w_0}$

p'	$\frac{w_s}{w_0}$	p'	$\frac{w_s}{w_0}$	p'	$\frac{w_s}{w_0}$	p'	$\frac{w_s}{w_0}$
$-\infty$	0	-0,5	0,24	0,2	0,61	0,9	0,9
-1,5	0,02	-0,4	0,28	0,3	0,66	1	0,92
-1	0,08	-0,3	0,34	0,4	0,72	1,5	0,98
-0,9	0,1	-0,2	0,39	0,5	0,76	2	0,99
-0,8	0,13	-0,1	0,44	0,6	0,8	∞	1
-0,7	0,16	0	0,5	0,7	0,84	—	—
-0,6	0,2	0,1	0,56	0,8	0,87	—	—

Третья методика разработана на основе теории расчета гравитационных отстойников с использованием осреднённых параметров взвесенесущих потоков без учета влияния русла водотока и количества наносов во взвесенесущем потоке [8]. На основе этой теории полная длина гравитационного отстойника L_K состоит из длины переходных участков l_1 и l_2 и длины рабочей части L_p , которая является расстоянием выпадения на дно взвешенных частиц. Приблизительно длину рабочей части можно определить на основе вычисления длины отлета частиц расчетного диаметра по формуле [8], [9]:

$$L_p = \alpha H_p v_{cp} / w, \quad (10)$$

где α — коэффициент запаса, равный 1,2–1,5; H_p — средняя расчетная глубина воды, м; v_{cp} — средняя скорость течения в камере (рабочая), м/с; w — гидравлическая крупность наносов, м/с.

Обсуждение результатов (The Discussion of the Results)

Приведем некоторые результаты расчетов расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь для создания оптимальных условий судоходства на р. Сож в районе г. Славгорода (табл. 2–5) и рис. 3–5.

Таблица 2

Результаты расчетов по первой методике при скорости потока $v = 0,3$ м/с

Диаметр частиц d , мм	Средневзвешенная гидравлическая крупность наносов w , мм/с	Относительная гидравлическая крупность	Коэффициент ξ	Расстояния оседания взвешенных частиц x , м	Коэффициент Шези
0,125	6,64	0,15900	24,100	259,69	22,50
0,13	7,15	0,17121	22,879	246,53	22,50
0,14	8,12	0,19444	20,556	221,50	22,50
0,15	9,15	0,21910	18,981	204,53	22,50
0,2	14,5	0,34721	12,149	130,91	22,50
0,25	20,5	0,49089	9,534	102,74	22,50
0,275	23,78	0,56943	8,160	87,93	22,50
0,3	27,45	0,65731	6,622	71,36	22,50
0,325	31,2	0,74710	5,051	54,42	22,50
0,35	35,05	0,83930	4,286	46,18	22,50
0,375	39	0,93388	3,529	38,03	22,50
0,4	42,6	1,02008	2,940	31,68	22,50
0,5	56,68	1,35724	1,928	20,78	22,50
0,6	71,55	1,71331	1,287	13,86	22,50
0,665	77,75	1,86177	1,138	12,26	22,50
0,7	85,7	2,05214	0,988	10,64	22,50
0,75	92,3	2,21018	0,951	10,25	22,50
0,775	95,65	2,29040	0,932	10,05	22,50
0,8	98,08	2,34859	0,919	9,90	22,50
0,85	102,95	2,46521	0,891	9,61	22,50
0,9	107,9	2,58374	0,864	9,31	22,50
1	116,85	2,79805	0,814	8,77	22,50
1,25	138	3,30450	0,696	7,50	22,50
1,5	156,5	3,74750	0,592	6,38	22,50
1,75	173,2	4,14739	0,499	5,38	22,50
2	187,5	4,48981	0,419	4,52	22,50

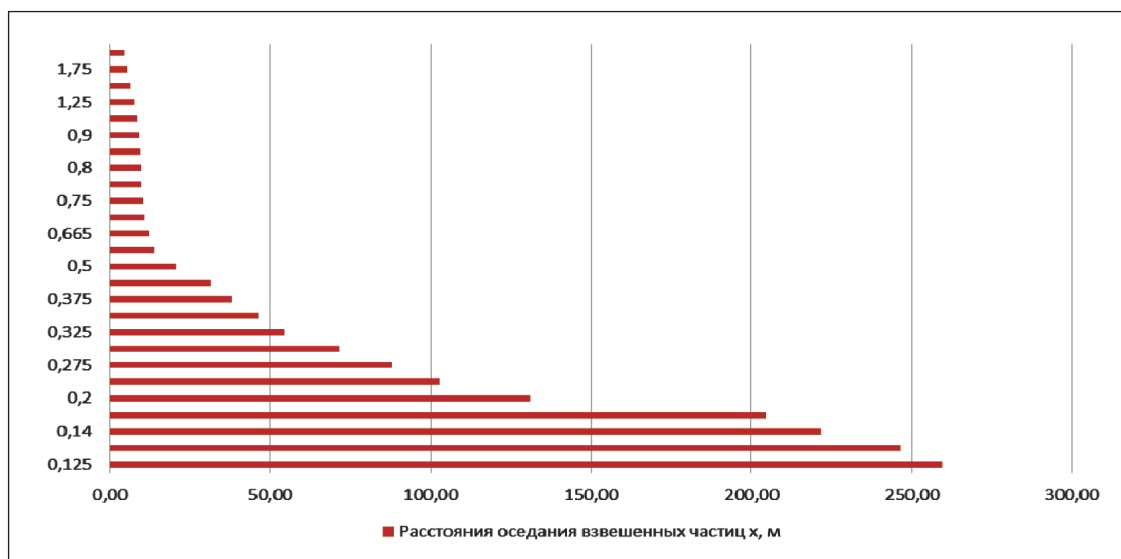


Рис. 3. Расстояния оседания взвешенных частиц
при $h = 1,5$ м, $n = 0,05$ и $v = 0,3$ м/с на р. Сож в районе г. Славгорода

Таблица 3

**Результаты расчетов по второй методике
при скорости потока $v = 0,3$ м/с**

Диаметр частиц d , мм	Гидравлическая крупность w , мм/с	Расстояния оседания взвешенных частиц x , м
0,125	6,64	1142,081
0,13	7,15	984,965
0,14	8,12	763,697
0,15	9,15	601,438
0,2	14,5	239,495
0,275	23,78	89,045
0,3	27,45	66,826
0,325	31,2	51,728
0,35	35,05	40,988
0,375	39	33,106
0,4	42,6	27,747
0,5	56,68	15,674
0,6	71,55	9,836
0,665	77,75	8,330
0,7	85,7	6,856
0,75	92,3	5,911
0,775	95,65	5,504
0,8	98,08	5,234
0,85	102,95	4,751
0,9	107,9	4,325
1	116,85	3,688
1,25	138	2,644
1,5	156,5	2,056
1,75	173,2	1,679
2	187,5	1,432

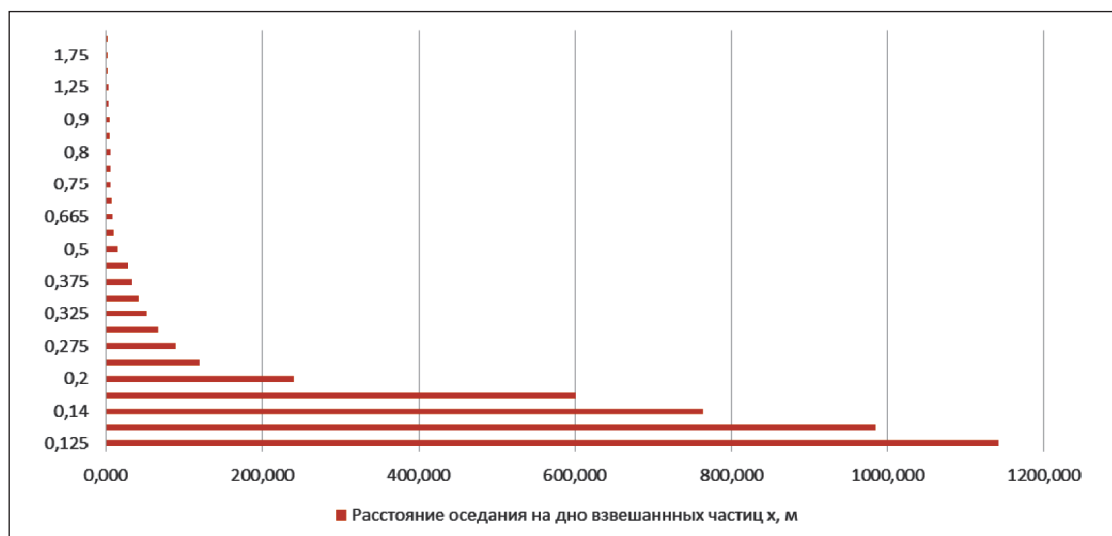


Рис. 4. Расстояния оседания взвешенных частиц при $h = 1,5$ м, $n = 0,05$ и $v = 0,3$ м/с на р. Сож в районе г. Славгорода

Таблица 4

**Результаты расчетов по третьей методике
при скорости потока $v = 0,3$ м/с**

Диаметр частиц d , мм	Гидравлическая крупность w , мм/с	Расстояния оседания на дно взвешенных частиц x , м
0,125	6,64	91,491
0,13	7,15	84,965
0,14	8,12	74,815
0,15	9,15	66,393
0,2	14,5	41,897
0,25	20,5	29,634
0,275	23,78	25,547
0,3	27,45	22,131
0,325	31,2	19,471
0,35	35,05	17,332
0,375	39	15,577
0,4	42,6	14,261
0,5	56,68	10,718
0,6	71,55	8,491
0,665	77,75	7,814
0,7	85,7	7,089
0,75	92,3	6,582
0,775	95,65	6,351
0,8	98,08	6,194
0,85	102,95	5,901
0,9	107,9	5,630
1	116,85	5,199
1,25	138	4,402
1,5	156,5	3,882
1,75	173,2	3,508
2	187,5	3,240

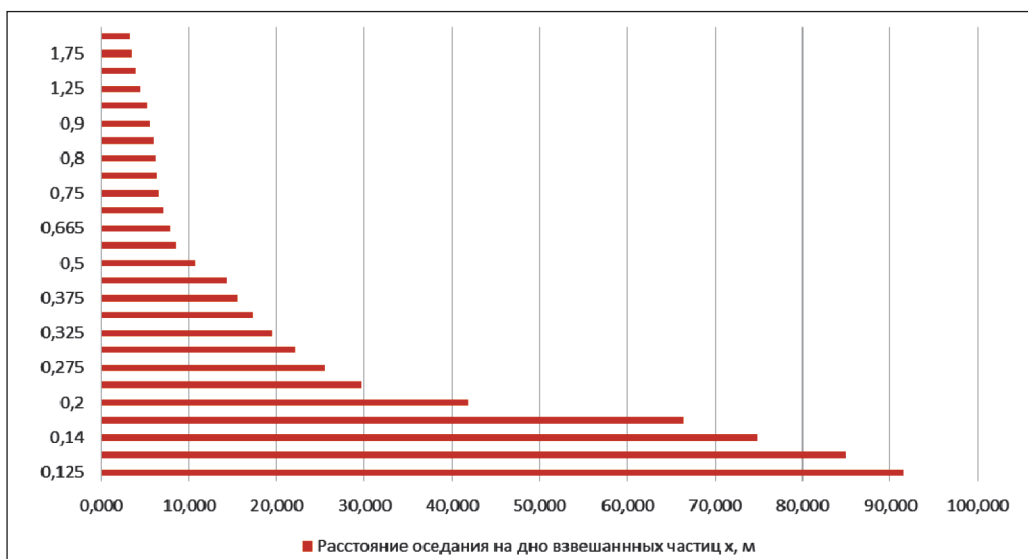


Рис. 5. Расстояния оседания взвешенных частиц при $h = 1,5$ м, $n = 0,05$ и $v = 0,3$ м/с на р. Сож в районе г. Славгорода

Размеры зон вредного воздействия при работе землесосного снаряда были рассчитаны и построены в ОАО «Белсудопроект» в соответствии с методикой определения зон вредного воздействия, представленной в «Положении о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществлении» [10]. На рис. 6 и 7 приведены схемы зон вредного воздействия на р. Сож в районе г. Славгорода (перекаты Никольский и Скиток).

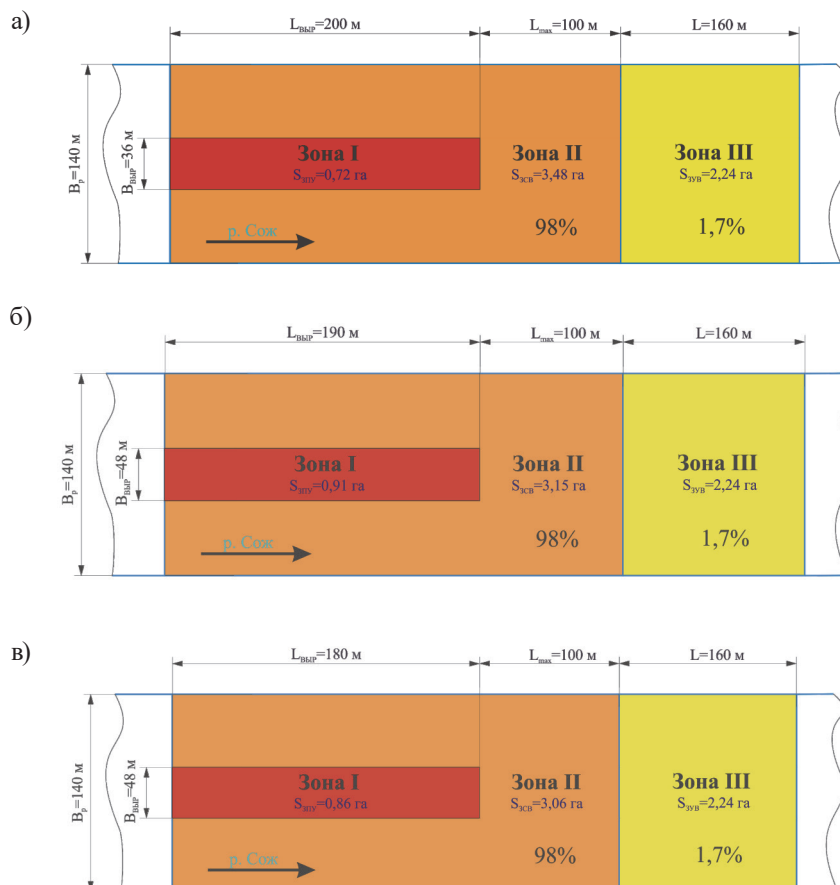


Рис. 6. Зоны вредного воздействия на перекате «Никольский–3»: а — прорезь № 1; б — прорезь № 2; в — прорезь № 3

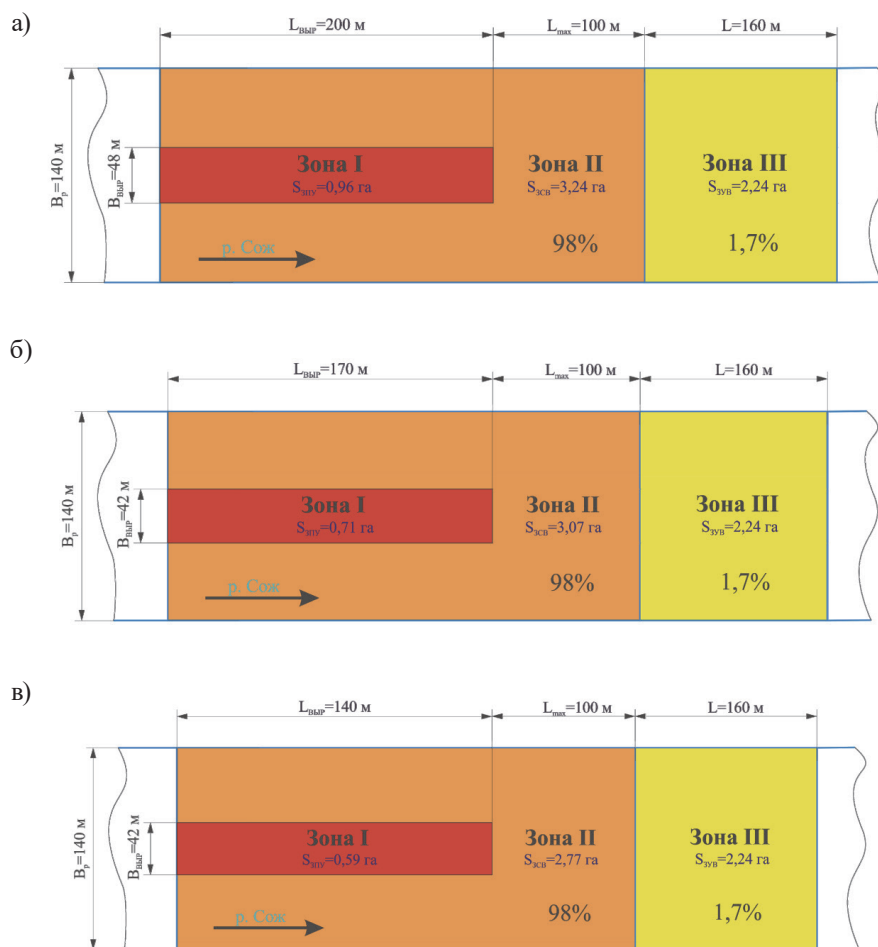


Рис. 7. Зоны вредного воздействия на перекате «Скиток–1»:
а — прорезь № 1; б — прорезь № 2; в — прорезь № 3

Сравнительный анализ расчетных данных, полученных по трем рассмотренным методикам, показывает, что первая методика, разработанная на основе теории турбулентного массопереноса и турбулентной диффузии, позволяет с достаточной точностью определить графоаналитическим методом искомые расстояния и размеры зоны вредного воздействия. Однако она дает достоверные данные по значениям расстояний выпадения взвешенных частиц лишь при относительной гидравлической крупности в пределах $w_r = 0,1-5$. Вторая методика, разработанная на основе эмпирической теории движения наносов, учитывает основные параметры взвешивающего потока такие, как мутность потока по его глубине, средняя скорость движения взвесенесущего потока, размеры и количество наносов и т. д. Главным недостатком ее является то, что она не учитывает влияние самого русла (его геометрических и гидродинамических характеристик) на взвесенесущий поток и дает значительное завышение расстояний выпадения на дно взвешенных частиц. Третья методика, разработанная на основе теории расчета гравитационных отстойников, дает возможность разработать сокращенную методику определения расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта. Однако она не учитывает влияние русла водотока и количество наносов во взвесенесущем потоке и может существенно занижить расстояния выпадения на дно взвешенных частиц.

Следует отметить, что все три разработанные методики могут быть использованы при расчете размеров зон вредного воздействия. Предлагаемая очередность использования методик: *первая, третья, вторая*. Эта очередность должна быть обязательно согласована с типом водотока, его основными геометрическими и гидродинамическими параметрами, гранулометрическим составом взвеси и его гидравлической крупностью и климатическими факторами.

Выводы (Conclusions)

Исходя из ранее изложенного, можно сделать следующие выводы относительно использования расчетных методик при определении зон вредного воздействия при работе землесосного снаряда на реках и каналах Республики Беларусь:

1. Первая методика, разработанная на основе теории турбулентного массопереноса и турбулентной диффузии, позволяет с достаточной точностью определить графоаналитическим методом искомые расстояния и размеры зон вредного воздействия. Однако она дает достоверные данные по значениям расстояний выпадения взвешенных частиц лишь при относительной гидравлической крупности в пределах $w_r = 0,1-5,0$.

2. Вторая методика, разработанная на основе эмпирической теории движения наносов, учитывает основные параметры взвешивающего потока, такие как мутность потока по его глубине, средняя скорость движения взвесенесущего потока, размеры и количество наносов и т. д. Главным ее недостатком является то, что она не учитывает влияние самого русла (его геометрических и гидродинамических характеристик) на взвесенесущий поток и дает значительное завышение расстояний выпадения на дно взвешенных частиц.

3. Третья методика, разработанная на основе теории расчета гравитационных отстойников, дает возможность разработать сокращенный алгоритм определения расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта. Однако она не учитывает геометрические и гидродинамические параметры русла и количество наносов во взвесенесущем потоке, что может привести к существенному занижению расчетных расстояний.

4. Следует отметить, что все три разработанных методики могут быть использованы при расчете размеров зон вредного воздействия. Основной методикой является первая. В случае невозможности ее применения используется третья методика. Для предварительной оценки зон вредного воздействия можно использовать вторую методику. Очередность использования методик должна быть обязательно согласована с типом водотока, его основными геометрическими и гидродинамическими параметрами, с гранулометрическим составом взвеси и его гидравлической крупностью и климатическими факторами.

5. Расчетные методики были использованы при определении расстояний выпадения на дно взвешенных частиц и расчете зон вредного воздействия при проведении дноуглубительных работ на р. Березина и Сож, Днепр и Неман.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лещев А. В. Влияние судоходного канала порта Архангельск на перенос взвешенных веществ в зоне смешения «река – море» устья реки Северной Двины / А. В. Лещев // Проблемы региональной экологии. — 2018. — № 2. — С. 17–21. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-12017.
2. Хованский А. Д. Оценка воздействия на окружающую среду углубления и расширения судоходных каналов в дельтах рек / А. Д. Хованский // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2018. — № 1 (197). — С. 104–111.
3. Зиновьев Е. А. О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну / Е. А. Зиновьев, А. Б. Китаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2015. — Т. 17. — № 5. — С. 283–288.
4. Сухинов А. И. Построение и исследование корректности математической модели транспорта и осаждения взвесей с учетом изменения рельефа дна / А. И. Сухинов, В. В. Сидорякина // Вестник Донского государственного технического университета. — 2018. — Т. 18. — № 4. — С. 350–361. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-4-350-361.
5. Haimann M. Monitoring and modelling concept for ecological optimized harbour dredging and fine sediment disposal in large rivers / M. Haimann, C. Hauer, M. Tritthart, D. Prenner, P. Leitner, O. Moog, H. Habersack // Hydrobiologia. — 2018. — Т. 814. — № 1. — С. 89–107. DOI: 10.1007/s10750-016-2935-z.
6. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): учеб. пособие / А. Д. Гиргидов. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. — 545 с.

7. Богомолов А. И. Гидравлика: учеб. пособие / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. — М.: Стройиздат, 1972. — 648 с.
8. Железняков Г. В. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика / Г. В. Железняков, Ю. А. Ибад-Ззаде; под ред. В. П. Недриги. — М.: Стройиздат, 1983. — 544 с.
9. Киселев П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев, А. Д. Альтшуль; под ред. П. Г. Киселева. — М.: Энергия, 1974. — 313 с.
10. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 7 февраля 2008 г. №168: в ред. постановлений Совмина от 31.08.2011 №1158, от 29.03.2016 №255. «Об утверждении положения о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществления» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://belzakon.net/Законодательство/Постановление_Совета_Министров_РБ/2008/69419 (дата обращения: 01.11.2019).

REFERENCES

1. Leshchev, A. V. "The impact of the ship canal of the port of Arkhangelsk on the suspended matter transfer in the mixing zone "river-sea" of the estuary of the Northern Dvina River." *Regional Environmental Issues* 2 (2018): 17–21. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-12017.
2. Khovanskiy, Alexandr D., Vladimir V. Latun, Oleg A. Khoroshev, and Valeriy I. Denisov. "Estimation of environmental impact of deepening and widening of navigable canals in river deltas." *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Natural Science* 1(197) (2018): 104–111.
3. Zinoviev, Evgeniy, and Alexander Kitaev. "About the impact of suspended particles on hydrofauna." *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 17.5 (2015): 283–288.
4. Sukhinov, A. I., and V. V. Sidoryakina. "Development and correctness analysis of the mathematical model of transport and suspension sedimentation depending on bottom relief variation." *Vestnik of Don State Technical University* 18.4 (2018): 350–361. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-4-350-361.
5. Haimann, Marlene, Christoph Hauer, Michael Tritthart, David Prenner, Patrick Leitner, Otto Moog, and Helmut Habersack. "Monitoring and modelling concept for ecological optimized harbour dredging and fine sediment disposal in large rivers." *Hydrobiologia* 814.1 (2018): 89–107. DOI: 10.1007/s10750-016-2935-z.
6. Girgirdov, A. D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika): ucheb. Posobie*. SPb.: Izdatel'stvo Politekhnikheskogo universiteta, 2007.
7. Bogomolov, A. I., and K. A. Mikhailov. *Gidravlika: ucheb. posobie*. M.: Stroiizdat, 1972.
8. Zheleznyakov, G. V., and Yu. A. Ibad-Zzade. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Spravochnik proektirovshchika*. Edited by V.P. Nedriga. M.: Stroiizdat, 1983.
9. Kiselev, P. G., and A. D. Al'tshul'. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam*. Edited by P.G. Kiselev. M.: Energiya, 1974.
10. Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 7 fevralya 2008 g. №168: v red. postanovlenii Sovmina ot 31.08.2011 №1158, ot 29.03.2016 №255. «Ob utverzhdenii polozheniya o poryadke opredeleniya razmerov kompensatsionnykh vyplat i ikh osushchestvleniya». Web. 1 Nov. 2019 <https://belzakon.net/Zakonodatel'stvo/Postanovlenie_Soveta_Ministrov_RB/2008/69419>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Алексей Павлович —
директор
ОАО «Белсудопроект»
246050, Республика Беларусь, г. Гомель,
ул. Пушкина, 11
e-mail: bsp_mtk@mail.ru
Качанов Игорь Владимирович —
доктор технических наук, профессор
УО «Белорусский национальный
технический университет»
220013, Республика Беларусь, г. Минск,
пр-т Независимости, 65
e-mail: ihar.kachanau@bntu.by

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afanas'ev, Aleksei P. —
Director
Belsudoproekt, OJSC
11 Pushkina Str., Gomel, 246050,
Republic of Belarus
e-mail: bsp_mtk@mail.ru
Kachanov, Igor' V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Belarusian National
Technical University
65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013,
Republic of Belarus
e-mail: ihar.kachanau@bntu.by

Шаталов Игорь Михайлович —
старший преподаватель
УО «Белорусский национальный
технический университет»
220013, Республика Беларусь, г. Минск,
пр-т Независимости, 65
e-mail: ishatalau@bntu.by

Shatalov, Igor' M. —
Senior Lecturer
Belarusian National
Technical University
65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013,
Republic of Belarus
e-mail: ishatalau@bntu.by

*Статья поступила в редакцию 18 ноября 2019 г.
Received: November 18, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ROUGHNESS COEFFICIENT OF METAL SPIRALLY-TWISTED CORRUGATED PIPES

K. P. Morgunov, Yu. K. Ivanovsky, A. Yu. Baranov

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
St. Petersburg, Russian Federation

Pipes made of corrugated metal structural elements have a roughness that differs from the roughness of technically smooth concrete pipes. The hydraulic operating conditions of corrugated pipes due to increased roughness of the walls have their own characteristics. The experimental works on determining the roughness coefficients of the inner surface of metal spirally-twisted corrugated pipes with a polymer and zinc coating are described in the paper. Two standard dimensions of corrugated pipes are considered: with a diameter of 500 mm with a corrugation, the corrugation dimensions are 68 × 13 mm; and with a diameter of 1,000 mm with corrugation dimensions of 125 × 26 mm. The non-pressure mode of flow in the pipe with various degrees of filling (0.2; 0.4; 0.6 and 0.8 for several slopes of the pipe position: 0.03; 0.02 and 0.01) is studied. The experimental setup is located in a tray with 2,000 mm width and 800 mm height. During the experiments, the water flow rate in the pipe, which determines the degree of its filling, is measured, as well as piezometers record the distribution of flow depths along the pipe length and control the flow uniformity. Based on the measured values, the hydraulic characteristics of the flow, namely, area of effective cross-section, wetted perimeter and hydraulic radius, using of which the roughness coefficient value is calculated by Chezy's formula, are computed. The roughness coefficient values for pipes with 1000 mm diameter at high degrees of filling are obtained using the theory of similarity. The research results have showed that the determined roughness coefficients for pipes of the considered diameter depend practically only on the pipes diameter and the corrugation dimensions, and do not depend on the slope of the pipe location, degree of filling, and lining material. Based on the results of the performed work, the quantitative values of the roughness coefficients for each pipe diameter are recommended.

Keywords: metal spirally-twisted corrugated pipes, experimental studies, roughness coefficient, hydraulic motion parameters.

For citation:

Morgunov, Konstantin P., Yuri K. Ivanovsky, and Andrey Yu. Baranov. "Experimental determination of the roughness coefficient of metal spirally-twisted corrugated pipes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 323–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335.

УДК 625.73

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПИРАЛЬНОВИТЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ТРУБ

К. П. Моргунов, Ю. К. Ивановский, А. Ю. Баранов

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты экспериментов по определению коэффициента шероховатости металлических гофрированных труб, необходимого для выполнения гидравлических расчетов водопропускных сооружений. Трубы из гофрированных металлических конструктивных элементов имеют шероховатость,

которая отличается от шероховатости технически гладких бетонных труб. Гидравлические условия работы гофрированных труб вследствие повышенной шероховатости стенок имеют свои особенности. В статье описаны экспериментальные работы по определению коэффициентов шероховатости внутренней поверхности металлических спиральновитых гофрированных труб с полимерным и цинковым покрытием. Рассмотрены два типоразмера гофрированных труб: диаметром 500 мм с гофром размерами гофра 68×13 мм; и диаметром 1 000 мм с гофром размерами 125×26 мм. Исследовался безнапорный режим течения потока в трубе с различными степенями наполнения: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 для нескольких уклонов расположения трубы: 0,03; 0,02 и 0,01. Экспериментальная установка находится в лотке шириной 2 000 мм и высотой 800 мм. При проведении экспериментов измерялся расход воды в трубе, определявший степень её наполнения, а также пьезометрами фиксировалось распределение глубин потока вдоль длины трубы и контролировалась равномерность потока. На основе измеренных величин выполнялись расчеты гидравлических характеристик потока: площади живого сечения, смоченного периметра и гидравлического радиуса, с использованием которых по формуле Шези рассчитывалось значение коэффициента шероховатости. Значения коэффициента шероховатости для труб диаметром 1000 мм при больших степенях наполнения получены с использованием теории подобия. Результаты исследований показали, что определяемые коэффициенты шероховатости для труб рассматриваемого диаметра зависят практически только от диаметра труб и размеров гофра и не зависят от уклона расположения трубы, степени наполнения и материала облицовки. На основе результатов выполненных работ рекомендованы количественные значения коэффициентов шероховатости для каждого диаметра труб.

Ключевые слова: спиральновитые гофрированные металлические водопропускные трубы, экспериментальные исследования, коэффициент шероховатости, гидравлические параметры движения.

Для цитирования:

Моргунов К. П. Экспериментальное определение коэффициента шероховатости металлических спиральновитых гофрированных труб / К. П. Моргунов, Ю. К. Ивановский, А. Ю. Баранов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 323–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335.

Introduction (Введение)

Водопропускные трубы из различного материала (бетонные, металлические, пластиковые) являются наиболее распространенным типом малых водопропускных сооружений, используемых при проектировании и строительстве автомобильных дорог. При этом могут быть использованы как гладкие, так и гофрированные трубы. Гофрированные трубы выполняются из металла с нормальным (МГТ) и спиральновитым (СВМГТ) гофром, у которых гофр составляет острый угол с диаметральной осью трубы (рис. 1). При этом величина угла спиральности ϕ изменяется в зависимости от размера гофра и диаметра трубы. С увеличением диаметра трубы угол спиральности уменьшается: для трубы с диаметром 1,2 м он равен $9^{\circ}21'$, а для труб диаметра 3,6 м — $3^{\circ}09'$. Угол спиральности оказывает влияние на гидравлические сопротивления и распределение глубин в СВМГТ.

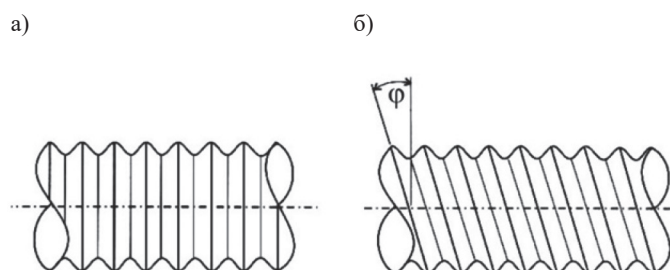


Рис. 1. Схемы труб с нормальным и спиральновитым гофром:
а — нормальная форма гофра; б — спиральная форма гофра

По параметрам гофра (рис. 2) наиболее распространенными являются СВМГТ с гофром 68×13 мм, 125×26 мм, 150×50 мм. По виду основного защитного покрытия различают гофрированные трубы с *одиночным покрытием* (цинковым, алюминиевым, сплавом цинка с алюминием

или другим металлизированным покрытием) и с *двойным покрытием* (металлизированное плюс полимерное покрытие), наносимым в заводских условиях.

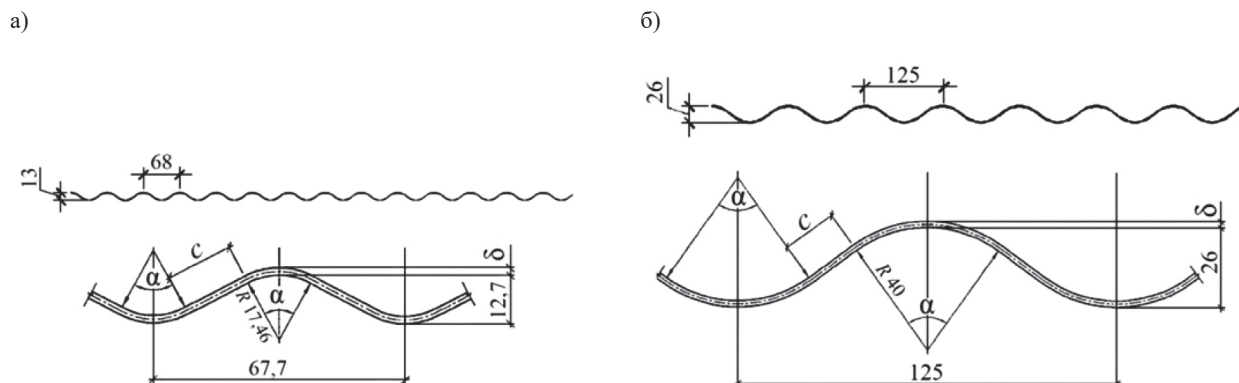


Рис. 2. Параметры гофра: 68 × 13 мм (а); 125 × 26 мм (б)

При проектировании водопропускных сооружений с применением СВМГТ российскими нормативными документами (СП 35.13330.2011 СНиП 2.05.03–84* «Мосты и трубы») определена необходимость выполнения гидравлических расчетов. При этом отраслевым дорожным методическим документом ОДМ 218.2.087–2017 «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из спиральновитых металлических гофрированных труб» рекомендовано при проектировании водопропускных сооружений с применением СВМГТ принимать, как правило, безнапорный режим работы. Реализация напорного или безнапорного режима работы определяется уклоном укладки труб, который, в свою очередь, зависит от пропускаемого трубой расхода и коэффициента шероховатости внутренней поверхности трубы. Кроме того, чтобы определить, будет ли труба «длинной» либо «короткой» в гидравлическом отношении, т. е. нужно ли при гидравлических расчетах учитывать наличие в трубе местных сопротивлений движению потока, следует выполнить расчет критического уклона потока, для которого также необходимо определить коэффициент шероховатости внутренней поверхности трубы.

Трубы из гофрированных металлических конструктивных элементов имеют шероховатость, отличающуюся от шероховатости технически гладких бетонных труб. Гидравлические условия работы гофрированных труб вследствие повышенной шероховатости стенок имеют свои особенности. Коэффициенты гидравлического сопротивления в таких трубах зависят от размера и формы гофра, расстояния между волнами гофра, типа швов, применения болтов или заклепок, шероховатости материала, способа изготовления, диаметра трубы и износа поверхности.

В соответствии с российскими отраслевыми дорожными методическими документами: ОДМ 218.2.001–2009 «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон)», ОДМ 218.2.082–2017 «Методические рекомендации по проведению гидравлических расчетов малых ИССО на автомобильных дорогах», разрешается проектировать работу гофрированных труб на постоянно действующих автодорогах лишь в безнапорном режиме. Работа в полунапорном и напорном режимах допускается только при их установке на временных автодорогах. Однако значительное количество исследований по оценке коэффициента шероховатости как в России, так и за рубежом проводилось для напорного режима работы гофрированных труб [1]–[3] либо для труб, в которых часть внутренней поверхности была защищена от разрушения гладким лотком (асфальтовое покрытие с бетонированием, предварительно нанесенный полимер с бетонированием, предварительно нанесенный полимер и полимеризированный асфальт) [4]–[6]. При этом основная часть исследований выполнена для труб с нормальным гофром (МГТ) [7], [8]. Исследования металлических труб со спиральным

гофром [9]–[11] показали, что на гидравлические сопротивления таких труб существенное влияние оказывает угол спиральности, с увеличением которого возрастают также сопротивления. Поэтому у труб большого диаметра, угол спиральности которых близок к 90° , сопротивления близки к сопротивлениям труб с кольцевым гофром. Наличие в трубах гладкого лотка несколько уменьшает (примерно на 15–20 %) коэффициент шероховатости.

Для СВМГТ, наиболее широко применяемого в Российской Федерации спирального гофра, размером 125×26 мм гидравлические исследования как без гладкого лотка по дну, так и с лотком практически не проводились. Одно из последних исследований [12], выполненное в МАДИ на экспериментальных моделях, определило следующие тенденции изменения коэффициента шероховатости:

- соотношение между коэффициентами шероховатости СВМГТ при безнапорном и напорном движении зависит от уклона водопропускной трубы, причем значения коэффициентов гидравлического сопротивления в зависимости от уклона при безнапорном движении могут быть как больше, так и меньше, чем при напорном режиме работы трубы (примерно на 10 %);

- на величину коэффициента шероховатости при безнапорном движении оказывает влияние степень наполнения трубы (отношение глубины потока в трубе к ее диаметру $a = \frac{h}{D}$), при $a \geq 0,45$ коэффициент шероховатости достигает максимального значения, которое в источнике [12] рекомендуется принимать в качестве расчетного;

- с увеличением уклона расположения трубы коэффициент шероховатости возрастает.

Все это определяет актуальность выполнения работ по оценке коэффициента шероховатости СВМГТ и его зависимости от различных условий движения потока.

Задачей выполняемых исследований являлось экспериментальное обоснование выбора величины коэффициента шероховатости СВМГТ при движении потока в трубе в безнапорном режиме при различной степени наполнения трубы.

Materials and Methods (Материалы и методы)

Экспериментальное определение коэффициента шероховатости основано на использовании формулы Шези для равномерного режима движения потока жидкости [13], которая устанавливает зависимость расхода от гидравлических характеристик потока:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (1)$$

где Q — расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω — площадь живого сечения потока, м^2 ;

C — коэффициент Шези, $\text{м}^{0,5}/\text{с}$;

$R = \frac{\omega}{\chi}$ — гидравлический радиус живого сечения, м;

χ — смоченный периметр, м;

i — гидравлический уклон, который при равномерном движении потока со свободной поверхностью равен геометрическому уклону дна и свободной поверхности.

Коэффициент Шези обычно определяют по формуле Н. Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (2)$$

где n — коэффициент шероховатости;

y — показатель степени.

Для определения скорости безнапорного потока в открытом русле используется также формула Маннинга [14]:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i},$$

которая для расхода примет вид

$$Q = \omega \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i}. \quad (3)$$

В 2002 г. формула Маннинга (3), до того считавшаяся эмпирической, была выведена теоретически Г. Джоем и Ф. А. Бомбарделли [15]. Формулу (3) можно преобразовать к виду, аналогичному формуле (1):

$$Q = \omega A \sqrt{Ri},$$

где коэффициент A будет определяться в виде

$$A = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}. \quad (4)$$

Таким образом, формула Н. Н. Павловского (2) переходит в формулу Маннинга (4), если показатель степени принять

$$y = \frac{1}{6}. \quad (5)$$

Объединив формулы (1), (2) и (5), получим выражение для расхода жидкости в открытом потоке:

$$Q = \omega \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \sqrt{Ri} = \frac{1}{n} \omega R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

откуда можно выразить коэффициент шероховатости следующим образом:

$$n = \frac{\omega R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{Q}. \quad (7)$$

Формула (7) также имеет название — *формула Маннинга* [14], по ней выполняется экспериментальное определение коэффициента шероховатости. Видно, что для определения коэффициента шероховатости по формуле (7) необходимо знать значения площади живого сечения потока, смоченного периметра и гидравлического радиуса, которые зависят от степени наполнения трубы, т. е. от отношения глубины потока в трубе к ее диаметру $a = \frac{h}{D}$.

Оценим величины живого сечения и гидравлического радиуса при различных значениях степени наполнения трубопровода. Живое сечение потока в трубе представляет собой круговой сегмент (рис. 3). Величина смоченного периметра — это длина дуги окружности AB .

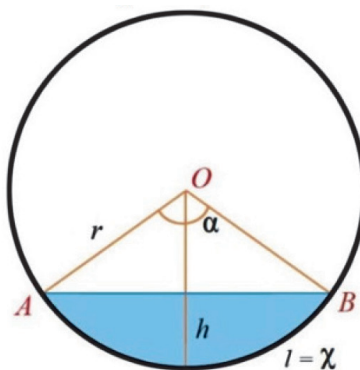


Рис. 3. Схема движения потока в трубе

Площадь сегмента круга находится как разность площади сектора AOB и площади равнобедренного треугольника AOB :

$$S_{\text{сегм}} = S_{\text{сект}} - S_{\text{треуг}}.$$

Очевидно, что эта площадь зависит от величины угла α , под которым из центра трубы видна свободная поверхность потока в трубе. Площадь живого сечения, выраженная через угол в градусах, определяется в виде

$$S_{\text{сегм}} = \frac{r^2}{2} \left(\pi \frac{\alpha}{180} - \sin \alpha \right). \quad (8)$$

Смоченный периметр потока — это длина дуги окружности, соответствующая углу α . Как известно, она определяется (если угол α выражен в градусах) в виде

$$\chi = l = \pi r \frac{\alpha}{180}. \quad (9)$$

Гидравлический радиус определится в виде $R = \frac{\omega}{\chi}$. Таким образом, основные гидравлические характеристики живого сечения потока: площадь, смоченный периметр, гидравлический радиус, определяются величиной угла α .

Из рис. 3 видно, что этот угол определится следующим образом:

$$\alpha = 2 \arccos \left(\frac{r-h}{r} \right),$$

где h — глубина потока воды в трубе.

В свою очередь, глубина безнапорного потока в трубе h при равномерном режиме движения (нормальная глубина) определяется степенью наполнения $a = \frac{h}{D}$.

В выполненных в рамках настоящей работы исследованиях было рассмотрено несколько степеней наполнения трубы: $a = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$. Оценим гидравлические характеристики потока на примере течения со степенью наполнения $a = 0,4$ (рис. 4). Глубина потока при этом $h = 0,8r$.

Из рис. 4 видно, что величина b (катет прямоугольного треугольника), определенная по теореме Пифагора, в этом случае

$$b = \sqrt{r^2 - (0,2r)^2} = \sqrt{0,96r^2} = 0,98r,$$

откуда

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{b}{r} = 0,98.$$

Тогда угол α в градусах определится как

$$\alpha = 2 \arcsin 0,98 = 2 \times 78,52^\circ = 157,04^\circ.$$

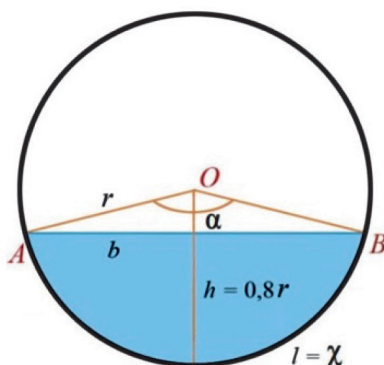


Рис. 4. Схема определения гидравлических характеристик потока в трубе при $a = 0,4$

Площадь живого сечения потока при степени наполнения $a = 0,4$ определяется из формулы (8):

$$\omega = \frac{r^2}{2} \left(\pi \frac{157,04}{180} - \sin 157,04 \right) = \frac{r^2}{2} \left(3,14 \frac{157,04}{180} - 0,39 \right) = 1,17r^2.$$

Смоченный периметр определяется из формулы (9):

$$\chi = \pi r \frac{\alpha}{180} = 3,14r \frac{157,04^\circ}{180^\circ} = 2,74r,$$

гидравлический радиус —

$$R = \frac{\omega_{0,4}}{\chi_{0,4}} = \frac{1,17R^2}{2,74R} = 0,43r.$$

Определенные аналогичным образом гидравлические характеристики потока для различных степеней наполнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Гидравлические характеристики потока в зависимости от степени наполнения

Степень наполнения	Нормальная глубина	Площадь живого сечения	Смоченный периметр	Гидравлический радиус
0,2	$h_0 = 0,4r$	$\omega_{0,2} = 0,47r^2$	$\chi_{0,2} = 1,85r$	$R_{0,2} = 0,24r$
0,4	$h_0 = 0,8r$	$\omega_{0,4} = 1,17r^2$	$\chi_{0,4} = 2,74r$	$R_{0,4} = 0,43r$
0,6	$h_0 = 1,2r$	$\omega_{0,6} = 1,97r^2$	$\chi_{0,6} = 3,54r$	$R_{0,6} = 0,55r$
0,8	$h_0 = 1,6r$	$\omega_{0,8} = 2,69r^2$	$\chi_{0,8} = 4,43r$	$R_{0,8} = 0,61r$

Эксперименты по определению коэффициентов шероховатости гофрированных труб проводились в русловом лотке гидротехнической лаборатории имени профессора В. Е. Тимонова ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Поперечные размеры лотка: ширина — 200 см, высота — 70 см.

Основой экспериментальной установки являлся металлический каркас, изготовленный из профиля 30 × 30 мм (рис. 5). С напорной стороны перпендикулярно продольной оси лотка на каркасе закреплялся щит, полностью перегородивающий поток в лотке. В щите выполнялось входное отверстие для оголовка гофрированной трубы, размеры которого определялись диаметром исследуемой трубы.

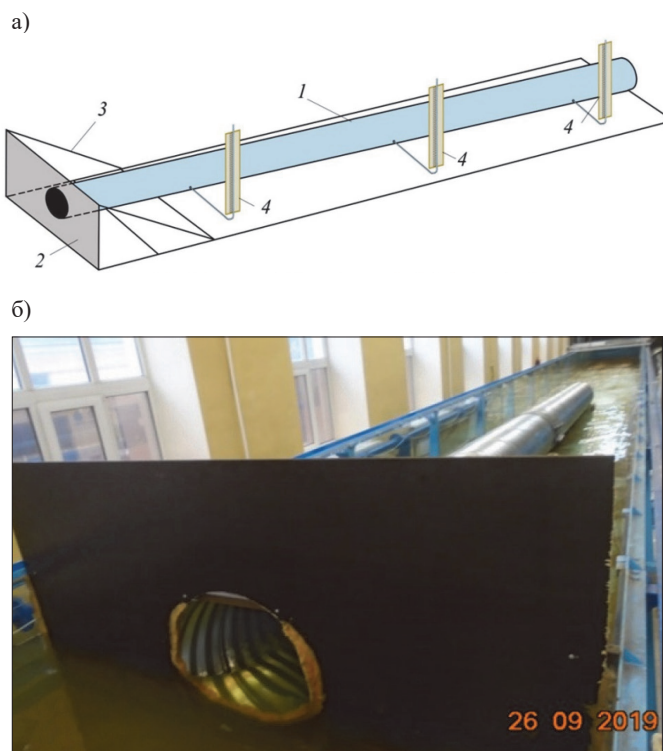


Рис. 5. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки

Условные обозначения:

- 1 — испытуемая гофрированная труба; 2 — щит с входным отверстием;
3 — металлический каркас; 4 — пьезометры

Исследовались четыре типа спиральновитых металлических гофрированных труб:

- труба с двойным полимерным покрытием Ø 500 мм, размеры гофра 68 × 13 мм;
- труба с одиночным цинковым покрытием Ø 500 мм, размеры гофра 68 × 13 мм;
- труба с двойным полимерным покрытием Ø 1 000 мм, размеры гофра 125 × 26 мм;
- труба с одиночным цинковым покрытием Ø 1 000 мм, размеры гофра 125 × 26 мм.

Длина трубы во всех случаях составляла около 10 000 мм (~ 10,0 м), труба монтировалась из двух частей по 5,0 м, соединенных бандажом. Исследовался характер течения для нескольких уклонов трубы: $i = 0,01$; $0,02$ и $0,03$. Для максимального уклона трубы (при равномерном режиме течения — это уклон дна трубы, уклон свободной поверхности потока и гидравлический уклон), равного $0,03$, при длине трубы 10 000 мм разница высотных отметок начального и конечного сечений трубы составит 300 мм. Поэтому нижняя кромка входного отверстия располагалась на отметке 300 мм от дна лотка. Нижняя кромка конечного (выходного) сечения трубы при уклоне $0,03$ установлена на дне руслового лотка. При исследовании течения с меньшими уклонами ($0,02$ и $0,01$) конечная часть трубы поднималась.

Равномерность характера движения воды в трубе означает равенство глубины потока вдоль ее оси. Для контроля движения вдоль оси в трубу были врезаны пьезометры, показывающие глубину потока. Места установки пьезометров выбраны так, чтобы исключить начальный (входной) участок трубы с еще не установившимся потоком и конечный (выходной) участок разлива потока из трубы. Всего вдоль гофрированной трубы было установлено шесть пьезометров. Расположение пьезометров вдоль по длине трубы приведено в табл. 2.

Таблица 2

Расстояния вдоль трубы между точками подключения пьезометров

Вид трубы	l_{0-1}	l_{1-2}	l_{2-3}	l_{3-4}	l_{4-5}	l_{5-6}	l_{6-7}
	см						
С полимерным покрытием Ø 500 мм	93,0	156,0	156,0	171,0	151,0	153,0	125,0
С цинковым покрытием Ø 500 мм	99,0	161,0	161,0	152,5	158,5	161,0	104,0
С полимерным покрытием Ø 1000 мм	108,5	163,5	154,5	158,5	151,0	152,0	112,0
С цинковым покрытием Ø 1000 мм	103,0	160,0	173,0	140,0	162,0	158,0	112,0

Расстояния между точками подключения пьезометров для каждой испытываемой трубы несколько изменялись, поскольку пьезометры каждый раз врезались во внешний гребень гофра, и, кроме того, в центральной части трубы располагался бандаж для соединения двух составных частей.

Results (Результаты)

Методика экспериментальных исследований

Эксперименты выполнялись по следующей методике:

- в русловой лоток с установленным в нем экспериментальным стендом подавалась вода;
- регулированием расхода воды устанавливались различные степени наполнения трубы;
- после установления равномерного характера течения в СВМГТ выполнялись замеры контролируемых величин: расхода и нормальной глубины;
- рассчитывались гидравлические характеристики течения: площадь живого сечения потока, смоченный периметр, гидравлический радиус живого сечения;
- по формуле Маннинга (7) рассчитывался коэффициент шероховатости.

При проведении экспериментальных исследований были зафиксированы следующие особенности режимов течения потока воды в трубах. Во всех случаях исследовался безнапорный режим движения воды в трубе. При входе потока в трубу после прохождения гидравлического сопротивления (внезапного сужения при переходе из лотка в трубу) формировался начальный уча-

сток течения с неравномерным характером движения (рис. 6). Протяженность начального участка во всех случаях проведенных испытаний отражалась на показаниях первого по длине пьезометра.

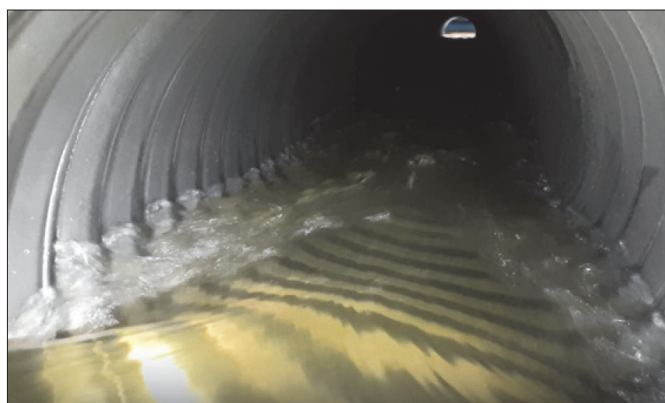


Рис. 6. Начальный участок потока в трубе

Далее в центральной (по длине) части трубы формировался участок с равномерным характером движения. Пьезометры фиксировали одинаковую глубину потока на этом участке, при этом уклон свободной поверхности потока соответствовал уклону дна трубы.

Как отмечалось ранее, формула Маннинга для расчетов коэффициента шероховатости справедлива для равномерного режима движения потока в трубе, при котором уклон свободной поверхности соответствует уклону дна трубы. Равномерность движения контролировалась по показаниям пьезометров, фиксировавших одинаковые глубины потока в центральной части трубы. Отсутствие в потоке гидравлических прыжков, нарушавших равномерность движения, определялось соотношением уклона дна трубы и критического уклона. В свою очередь, критический уклон при безнапорном режиме движения определяется по формуле Шези [13]:

$$i_{кр} = \frac{Q^2 n^2}{\omega_{кр}^2 R_{кр}^{\frac{4}{3}}},$$

где $\omega_{кр}$ — значения площади живого сечения; $R_{кр}$ — значения гидравлического радиуса, определяемые для критической глубины потока $h_{кр}$.

Критическая глубина зависит от формы и размеров живого сечения и расхода жидкости и определяется соотношением

$$\frac{\omega_{кр}^3}{B_{кр}} = \frac{Q^2}{g},$$

где $B_{кр}$ — ширина потока по «зеркалу» (в обозначениях на рис. 4 $B_{кр} = 2b$ при $h = h_{кр}$).

Расчеты показали, что в исследуемых в проведенных экспериментах случаях критические уклоны находятся в диапазоне 0,009–0,013. Поэтому уклоны 0,03 и 0,02 заведомо больше критического. При уклоне трубы 0,01 действительные глубины потока в трубе, определяемые степенью наполнения, оказывались существенно большими, чем критические глубины, что также исключало возможность возникновения гидравлических прыжков. Так, например, для трубы диаметром 0,5 м с полимерным покрытием при расходе 9,5 л/с, обеспечившим действительную глубину потока на равномерном участке около 0,1 м, расчеты критической глубины дали значение 0,038 м.

Результаты экспериментальных исследований

Исследования были проведены для разных уклонов дна труб: 0,03; 0,02 и 0,01 при разных степенях заполнения. Измерения показали, что в центральной части трубы формируется участок с режимом движения, близким к равномерному, с постоянной глубиной потока и уклоном, равным уклону дна (или оси) трубы. На рис. 7 представлен типичный пример распределения глубин потока вдоль оси трубы (линия свободной поверхности) для случая оцинкованной трубы

диаметром 500 мм при уклоне 0,02. Отметки вдоль горизонтальной оси графика соответствуют точкам подключения пьезометров. Видно, что в средней части трубы устанавливается равномерное движение и лишь на концевом участке линия свободной поверхности несколько искажается.

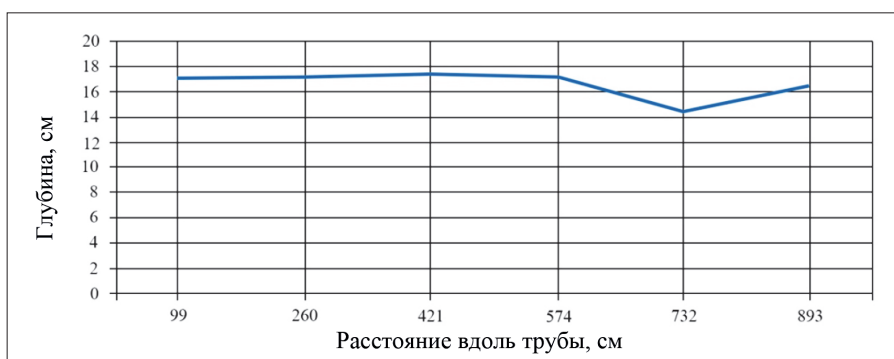


Рис. 7. Глубины потока в трубе Ø 500 мм при уклоне 0,02

Результаты экспериментального определения коэффициентов шероховатости для труб диаметром 500 мм приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты шероховатости труб Ø 500 мм

Облицовка	Уклон	Коэффициент шероховатости	Среднее значение	Разброс относительно среднего значения, %
Полимер	0,03	0,02039	0,02018	1,03
	0,02	0,01965		2,64
	0,01	0,02050		1,60
Оцинковка	0,03	0,02076	0,02047	1,42
	0,02	0,01993		2,63
	0,01	0,02072		1,21

Для СВМГТ диаметром 1,0 м, по условиям конструкции экспериментального стенда, фиксированные испытания были проведены для степеней наполнения 0,2 и 0,4. Максимальные степени наполнения, которых удалось достичь на стенде, составили 0,42. Поэтому дополнительно к экспериментальным исследованиям для труб диаметром 1000 мм были выполнены модельные расчеты с использованием методов теории подобия [16], [17].

Линейные размеры исследованных в настоящей работе труб меньшего размера (диаметр 500 мм, размеры гофра 68 × 13 мм) имеют по отношению к трубам большего размера (диаметр 1 000 мм, размеры гофра 125 × 26 мм) линейный масштаб 1 : 2 как по поперечным размерам, так и по размерам гофра. Поэтому возможно применение методов теории подобия для получения характеристик труб большего размера с использованием результатов, полученных на трубах меньшего диаметра.

Моделирование выполняется из условия соблюдения равенства для модели (труба диаметром 500 мм) и натуре (труба диаметром 1 000 мм) критерия Фруда $Fr = \frac{v^2}{gl}$, который характеризует соотношение между силами инерции и силами, в поле которых происходит движение потока (силами тяжести). Эти условия дают следующие масштабы для определяемых параметров:

- для линейных размеров (горизонтальных и вертикальных) $b_l = 2$;
- для скоростей движения потока $b_v = \sqrt{b_l} = 1,41$;
- для расхода воды $b_Q = b_l^{\frac{5}{2}} = 5,66$;
- для коэффициента шероховатости $b_n = b_l^{\frac{1}{6}} = 1,12$.

Такое масштабирование было использовано при получении результатов для труб диаметром 1000 мм при степенях наполнения $a = 0,6$ и $0,8$. Предварительно метод подобия был протестирован на экспериментальных результатах, полученных на трубах диаметром 1000 мм для меньших значений степени наполнения. Сопоставление результатов, полученных при масштабном пересчете с использованием теории подобия для небольших степеней заполнения, с экспериментальными данными показало хорошее их совпадение, что подтвердило действенность и результативность такого подхода.

Обобщенные результаты значений коэффициентов шероховатости спиральновитых гофрированных труб диаметром 1000 мм и размером гофра 125×26 мм приведены в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты шероховатости труб Ø 1000 мм

Облицовка	Уклон	Коэффициент шероховатости	Среднее значение	Разброс относительно среднего значения, %
Полимер	0,03	0,02629	0,02541	3,45
	0,02	0,02481		2,37
	0,01	0,02514		1,08
Оцинковка	0,03	0,02628	0,02535	3,68
	0,02	0,02552		0,70
	0,01	0,02424		4,37

Обсуждение (Discussion)

Результаты выполненной серии экспериментов для спиральновитых металлических гофрированных труб диаметром 500 мм и размерами гофра 68×13 мм, а также диаметром 1000 мм и размерами гофра 125×26 мм с различным покрытием показали, что определяемые коэффициенты шероховатости для труб рассматриваемого диаметра зависят практически только от диаметра труб и размеров гофра. Полученные коэффициенты шероховатости не зависят от уклона расположения трубы, степени наполнения и материала облицовки. Такой результат представляется вполне обоснованным, поскольку само понятие шероховатости, количественной характеристикой которого является коэффициент шероховатости, характеризует прежде всего качество поверхности: ее размеры, кривизну и неровности.

Результаты, представленные в исследовании [12] и показавшие, что полученный автором «коэффициент шероховатости» зависит от степени наполнения, уклона трубы и некоторых других условий движения потока, свидетельствуют, скорее всего, о том, что параметр, исследуемый в работе [12], является неким условным коэффициентом гидравлического сопротивления. В этом случае находит объяснение его зависимость от всех указанных ранее характеристик потока.

Выводы (Conclusions)

По итогам выполненных в рамках настоящей работы исследований установлено следующее:

- среднее значение коэффициента шероховатости труб Ø 500 мм получено $n = 0,0203$;
- среднее значение коэффициента шероховатости труб Ø 1000 мм получено $n = 0,0254$.

Эти значения рекомендуется использовать при выполнении гидравлических расчетов водопропускной способности соответствующих спиральновитых металлических гофрированных труб.

Работа выполнена совместно и при финансовой поддержке ООО «Мегатех инжиниринг» (г. Санкт-Петербург).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дж. Питер Олт. Исследования в условиях строительства гофрированных стальных труб с полимерным покрытием. Национальная ассоциация по производству гофрированных стальных труб / Дж. Питер Олт; Американский институт железа и стали. — NW, Washington DC., 2012. — 39 с.

2. Алтунин В. И. К вопросу выбора расчетного гидравлического режима при проектировании металлических гофрированных водопропускных труб / В. И. Алтунин, А. В. Бурлаченко, О. Н. Черных // *Природообустройство*. — 2014. — № 2. — С. 51–57.
3. Черных О. Н. Экспериментальные исследования металлической гофрированной водопропускной трубы при частично-напорном режиме / О. Н. Черных, В. И. Алтунин, А. В. Бурлаченко // *Приволжский научный журнал*. — 2015. — № 1 (33). — С. 28–36.
4. Алтунин В. И. Гидравлические сопротивления водопропускных труб из гофрированного металла с повышенной абразивной устойчивостью / В. И. Алтунин, А. В. Бурлаченко, О. Н. Черных // *Гидротехническое строительство*. — 2016. — № 6. — С. 23–29.
5. Черных О. Н. Повышение эффективности гидравлической работы дорожных водопропускных труб / О. Н. Черных, В. И. Алтунин, А. В. Бурлаченко // *Природообустройство*. — 2016. — № 2. — С. 42–47.
6. Ханов Н. В. Гидравлические аспекты обеспечения надёжной и безопасной работы трубчатых водопропускных сооружений из гофрированного металла / Н. В. Ханов, А. В. Бурлаченко // *Природообустройство*. — 2016. — № 5. — С. 32–39.
7. Altunin V. I. Hydraulic resistance of a helially corrugated metal pipe culvert / V. I. Altunin, O. N. Chernykh // *Power Technology and engineering*. — 2016. — Vol. 50. — Is. 2. — Pp. 125–129. DOI: 10.1007/s10749-016-0672-0
8. Черных О. Н. Особенности гидравлического расчета водопропускных сооружений с круглой трубой из металлических гофрированных структур в частично-напорном и напорном режимах труб / О. Н. Черных, Н. В. Ханов, А. В. Бурлаченко // *Природообустройство*. — 2018. — № 4. — С. 40–47. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-40-47
9. Алтунин В. И. Гидравлические сопротивления металлической гофрированной водопропускной трубы со спиральной формой гофра / В. И. Алтунин, О. Н. Черных // *Гидротехническое строительство*. — 2016. — № 1. — С. 31–36.
10. Ушаков В. В. Работа водопропускной трубы со спиральной формой гофра / В. В. Ушаков, В. И. Алтунин, О. Н. Черных, А. В. Бурлаченко // *Наука и техника в дорожной отрасли*. — 2016. — № 1 (75). — С. 14–17.
11. Altunin V. I. Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance / V. I. Altunin, A. V. Burlachenko, O. N. Chernykh // *Power Technology and engineering*. — 2016. — Vol. 4. — Is. 50. — Pp. 385–390. DOI: 10.1007/s10749-016-0718-3
12. Бурлаченко А. В. Совершенствование методов расчета и проектирования водопропускных сооружений из гофрированного металла: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Бурлаченко. — М.: МАДИ 2017. — 214 с.
13. Моргунов К. П. Гидравлика / К. П. Моргунов. — СПб.: Издательство «Лань», 2014. — 288 с.
14. Штеренлихт Д. В. Гидравлика / Д. В. Штеренлихт. — СПб.: Издательство «Лань», 2015. — 656 с.
15. Gioia G. Scaling and similarity in open channel flows / G. Gioia, F. A. Bombardelli // *Physical Review Letters*. — 2002. — Vol. 88. — Is. 1. — Pp. 253–277.
16. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений / И. И. Леви. — Л.: Энергия, 1967. — 235 с.
17. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. — М.: Наука, 1977. — 440 с.

REFERENCES

1. Olt, Dzh. Piter. *Issledovaniya v usloviyakh stroitel'stva gofrirovannykh stal'nykh trub s polimernym pokrytiem. Natsional'naya Assotsiatsiya po Proizvodstvu Gofrirovannykh Stal'nykh Trub*. NW, Washington DC., 2012.
2. Altunin, V. I., A. V. Burlachenko, and O. N. Chernykh. "On the question of the choice of the rated hydraulic mode when designing metallic corrugated culvert pipes." *Prirodoobustroistvo* 2 (2014): 51–57.
3. Chernykh, Olga Nikolaevna, Vladimir Ilich Altunin, and Alyona Vladimirovna Burlachenko. "Experimental investigation of corrugated metal pipe with partly full flow." *Privolzhsky Scientific Journal* 1(33) (2015): 28–36.
4. Altunin, V. I., A. V. Burlachenko, and O. N. Chernykh. "Gidravlicheskie soprotivleniya vodopropusnykh trub iz gofrirovannogo metalla s povyshennoi abrazivnoi ustoichivost'yu." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 6 (2016): 23–29.

5. Chernykh, Olga Nikolaevna, Vladimir Iljich Altunin, and Alena Vladimirovna Burlachenko. "Increase of effectiveness of the hydraulic operation of road culvert pipes." *Prirodoobustroistvo* 2 (2016): 42–47.
6. Khanov, N. V., and A. V. Burlachenko. "Hydraulic aspects of ensuring reliable and safe operation of tubular corrugated culverts." *Prirodoobustroistvo* 5 (2016): 32–39.
7. Altunin, V. I., and O. N. Chernykh. "Hydraulic resistance of a helially corrugated metal pipe culvert." *Power Technology and engineering* 50.2 (2016): 125–129. DOI: 10.1007/s10749-016-0672-0.
8. Chernich, Olga Nikolaevna, Nartmir Vladimirovich Khanov, and Alena Vladimirovna Burlachenko. "Features of hydraulic calculation of culverts with a round pipe made of metal corrugated structures in partially-pressure and pressure modes." *Prirodoobustroistvo* 4 (2018): 40–47. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-40-47.
9. Altunin, V. I., and O. N. Chernykh. "Gidravlicheskie soprotivleniya metallicheskoj gofirovannoi vodopropusknoi truby so spiral'noi formoi gofra." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 1 (2016): 31–36.
10. Ushakov, V. V., V. I. Altunin, O. N. Chernykh, and A.V. Burlachenko. "Hydraulic resistance of corrugated metal culvert with a spiral corrugation." *Science and Engineering for Highways* 1(75) (2016): 14–17.
11. Altunin, V. I., A. V. Burlachenko, and O. N. Chernykh. "Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance." *Power Technology and engineering* 4.50 (2016): 385–390. DOI: 10.1007/s10749-016-0718-3.
12. Burlachenko, A. V. Sovershenstvovanie metodov rascheta i proektirovaniya vodopropusknykh sooruzhenii iz gofirovannogo metalla. PhD diss. M.: MADI 2017.
13. Morgunov, K. P. *Gidravlika*. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2014.
14. Shterenlikht, D. V. *Gidravlika*. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2015.
15. Gioia, G., and F. A. Bombardelli. "Scaling and similarity in open channel flows." *Physical Review Letters* 88.1 (2002): 253–277.
16. Levi, I. I. *Modelirovanie gidravlicheskich yavlenii*. L.: Energiya, 1967.
17. Sedov, L. I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike*. M.: Nauka, 1977.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Моргунов Константин Петрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

Ивановский Юрий Кириллович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru

Баранов Андрей Юрьевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет промышленных
технологий и дизайна»
191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 18
e-mail: baranovspb@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Morgunov, Konstantin P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

Ivanovsky, Yuri K. — Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru

Baranov, Andrey Yu. —
PhD, associate professor
Saint Petersburg State University of Industrial
Technologies and Design
18 Bolshaya Morskaya Str., St. Petersburg, 191186,
Russian Federation
e-mail: baranovspb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 января 2020 г.
Received: January 22, 2020.

STUDYING THE GRANULAR ROUGHNESS OF RIVER CHANNELS BOTTOM

G. L. Gladkov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The main tasks of the dynamics of channel flows, the solution of which depends on the quality of hydraulic calculations and the reliability of channel forecasts in rivers with moving soil of bottom sediments, are the problems of estimating energy losses along the length and determining the flow rate of channel deposits in the natural river channels. In the river flows, these issues are interconnected through the mechanism of interaction between the stream and the deformable riverbed. By nowadays, it has been possible to obtain a large number of calculated recommendations in the field of sediment transport modelling. Considering that a universal solution in river hydraulics has not been established yet, this problem remains relevant. The performed work is devoted to the issues of assessing the hydraulic resistance of the channel and improving the model of sediment transport in rivers using the database of field measurements on rivers. The results obtained during the research have improved the quality of sediment transport modelling. In the event that the purpose of hydraulic calculations is to compute the free surface marks along the length, then on the rivers sections where the large bottom sediments predominate and sediment transport is limited, preference should be given to the calculated dependencies having the structure of A.P. Zegzhd formula. On the rivers with fine-grained soils, it is proposed to use in the calculations the dependencies constructed on the basis of the established relation between the Chezy coefficient and the current velocity. When the purpose of hydraulic calculations is to forecast channel reformation on a river section, it is recommended to use the modified L. van Rijn formula to calculate channel sediment discharge. At the same time, it is recommended to evaluate the granular bottom roughness in the sediment flow formula using the Manning – Strickler and A. P. Zegzhd formulas.

Keywords: morphometric characteristics of the channel, water flow rate, water discharge, sediment transport, Sediment discharge, energy loss gradient, Chezy coefficient, shear stress on the bottom, Reynolds number, channel reformation.

For citation:

Gladkov, Gennadii L. "Studying the granular roughness of river channels bottom." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 336–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.

УДК 556.536

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕРНИСТОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ДНА РЕЧНЫХ РУСЕЛ

Г. Л. Гладков

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Выполнено исследование основных задач динамики русловых потоков, от решения которых зависит качество гидравлических расчетов и надежность русловых прогнозов в реках с подвижными грунтами донных отложений, таких как оценка потерь энергии по длине и определение расхода русловых наносов в естественных руслах рек. В речных потоках эти вопросы взаимосвязаны между собой через механизм взаимодействия потока и деформируемого русла реки. К настоящему времени удалось получить большое количество расчетных рекомендаций в области моделирования транспорта наносов. Учитывая, что универсального решения в речной гидравлике до настоящего времени не установлено, данная проблема остается по-прежнему актуальной. Выполненная работа посвящена вопросам оценки гидравлического сопротивления русла и совершенствованию модели транспорта наносов в реках с использованием базы данных натурных измерений на реках. Полученные в ходе проведения исследований результаты позволили улучшить качество моделирования транспорта наносов. В результате прове-

денных исследований был сделан следующий вывод: в том случае, если целью гидравлических расчетов является вычисление отметок свободной поверхности по длине, то на участках рек, где преобладают крупные донные отложения и транспорт наносов ограничен, предпочтение следует отдать расчетным зависимостям, имеющим структуру формулы А. П. Зегжды. На реках с мелкозернистыми грунтами предлагается использовать в расчетах зависимости, построенные на основе установленной связи коэффициента Шези от скорости течения. Когда целью гидравлических расчетов является прогноз русловых переформирований на участке реки, для вычисления расхода русловых наносов рекомендуется использовать модифицированную формулу Л. ван Рейна. При этом оценку зернистой шероховатости дна в формуле расхода наносов рекомендуется выполнять с помощью формул Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды.

Ключевые слова: морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, градиент потерь энергии, коэффициент Шези, касательное напряжение на дне, число Рейнольдса, русловые переформирования.

Для цитирования:

Гладков Г. Л. Исследование зернистой шероховатости дна речных русел / Г. Л. Гладков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 336–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.

Введение (Introduction)

В отечественной и зарубежной практике до настоящего времени для определения расхода русловых наносов широко применяются расчетные зависимости, имеющие структуру формулы Е. Мейер-Петера и Р. Мюллера [1], в которой величина расхода наносов g_s вычисляется в виде функции, представляющей разность касательных напряжений на дне потока $g_s(\mu\Theta - \Theta_c)^m$. При этом величина коэффициента подвижности Θ частиц речного аллювия на дне потока находится в зависимости от динамической скорости потока как $\Theta \equiv \tau_* = \rho(U_*^2) / (\rho_s - \rho)gd$, а критическое значение коэффициента подвижности Θ_c находится обычно по графику Шильдса [2] в зависимости от числа Рейнольдса: $Re_{*c} = U_{*c}d/\nu$.

Исходные зависимости для нахождения Θ_c , отвечающих началу сдвига частиц на дне потока, были получены по данным экспериментов, проводимых с однородным грунтом при перемещении частиц по безгрядовому дну. Поэтому в реальных условиях приходится корректировать значения величины влекущей силы с использованием так называемого «ripple-фактора» μ .

В расчетах естественных речных потоков с неоднородным грунтом приходится корректировать величину критического значения коэффициента подвижности, выделяя «*hiding/exposure-factor*» с использованием выражения вида $\Theta_{ci} = \xi_i \Theta_{cm}$. Здесь Θ_{ci} и Θ_{cm} , соответственно, критические значения коэффициента подвижности для i -й фракции грунта и для частиц грунта средней крупности в смеси. С помощью такого подхода удастся учесть различную вероятность сдвига частиц грунта различной крупности в смеси на дне потока. Для вычисления этих параметров имеет ряд расчетных рекомендаций [3]–[6].

В работах авторов [7], [8], по материалам измерений расхода влекомых наносов на гидрологических постах рек с различной крупностью донных отложений, было выполнено тестирование формул расхода влекомых наносов. Тестовые расчеты выполнялись для среднего диаметра частиц и пофракционно по формулам Мейер-Петера и Мюллера [1], Г. Эйнштейна [9], Л. ван Рейна [10], а также ряда других авторов — всего было выполнено тридцать различных моделей расчета. Для пофракционного расчета расхода наносов использовались известные модификации формул, полученные Дж. Рибберинком [4] и Б. Зенгеном [6].

Тестовые расчеты показали, что из всех рассмотренных вариантов наилучшие результаты сопоставления с натурными данными были получены на основе формулы Л. ван Рейна [10], полученной автором для вычисления расхода мелкозернистых наносов в реках. Модификация данной зависимости, выполненная в работах [7], [8] с использованием материалов экспериментальных исследований В. С. Кнороза [11], позволила расширить область ее возможного применения для более широкого диапазона крупности частиц разнородного грунта донных отложений в реках.

Затруднения для использования полученной методики вычисления расхода русловых наносов заключаются в следующем. Во-первых, для определения величины влекущей силы при вычислении расхода наносов необходимо иметь сведения об измеренных уклонах свободной поверхности либо вычислять величину потерь энергии по длине с использованием одной из формул коэффициента Шези. При выполнении тестовых расчетов в работах [7], [8] имелись сведения об измеренных уклонах, что позволило получить достаточно высокую корреляцию рассчитанных и измеренных значений расходов наносов на гидрологических постах.

В реальной практике при моделировании русловых переформирований в реках значения отметок свободной поверхности и скорости течения воды находятся расчетным путем на каждом шаге вычислений при решении уравнения движения воды. Рекомендации по выбору соответствующей формулы коэффициента Шези приводятся в работе [8], однако непосредственно приведенные зависимости имеют определенные погрешности, что, в конечном итоге, сказывается на надежности определения искомой величины расхода наносов.

Во-вторых, для использования рекомендованной формулы расхода наносов в расчетной практике в процессе вычислений необходимо применять определенную методику для выделения грядовой составляющей коэффициента Шези из общей величины потерь энергии по длине. В работе [8] параметры донных гряд и величина сопротивления движению воды, вызываемая *донными грядами*, находятся по рекомендациям М. Ялина [5], [6]. В целом использование данных рекомендаций дает вполне удовлетворительный результат, однако сама методика представляется достаточно сложной и, безусловно, вносит дополнительные погрешности при вычислении величины расхода наносов.

На данном этапе работы предпринимается попытка исключить промежуточные этапы вычислений, связанные с выделением грядовой составляющей потерь энергии по длине, а величину коэффициента подвижности в формуле расхода наносов находить с помощью коэффициента Шези по известной формуле зернистой шероховатости.

Учитывая, что в расчетной практике используется достаточно большое количество таких формул, в настоящей работе выполняется их тестовая оценка и разрабатываются рекомендации по совершенствованию методики вычисления параметров транспорта наносов в реках.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В инженерной практике для оценки сопротивления зернистой шероховатости в руслах рек до настоящего времени широко применяется эмпирическая расчетная зависимость в виде формулы Маннинга – Штриклера [12]:

$$C_d/\sqrt{g} = 6,67(R/d_{50})^{1/6}. \quad (1)$$

Вторая группа расчетных зависимостей построена на основе логарифмической формулы А. П. Зегжды [13], которая была получена автором исследования в результате проведения экспериментов в открытых лотках с наклеенной шероховатостью:

$$C_d/\sqrt{g} = 5,66 \lg(R/\Delta) + 6,01, \quad (2)$$

где Δ — высота выступов шероховатости, принимаемая, соответственно, равной $\Delta = 1,6d_{50}$ для песчаных частиц, $\Delta = 1,3d_{50}$ для частиц мелкого гравия и $\Delta = d_{50}$ для среднего и крупного гравия.

Исследованиями гидравлического сопротивления галечного дна в натурных условиях занимался Дж. Гриффитс [14]. На участках первой группы анализируемых рек галька не двигалась, и дно было относительно ровным. На участках второй группы наблюдался транспорт наносов в форме движения донных гряд. На участках первой группы гидравлический радиус изменялся в пределах 0,12–8,99 м, а медианный диаметр донных частиц, по данным ситового анализа, колебался в пределах 0,013–0,301 м. С учетом выполненных измерений других ученых (всего 186 точек) Гриффитс получил формулу сопротивления русла с неподвижным дном, аналогичную формуле А. П. Зегжды:

$$C_d / \sqrt{g} = 5,60 \lg(R / d_{50}) + 2,15. \quad (3)$$

Исследования, выполненные также другими учеными, показали, что в естественных руслах рек величина гидравлического сопротивления движению воды оказывается существенно больше, чем было установлено в экспериментах А. П. Зегжды. При этом в речных потоках общая структура расчетной зависимости для оценки сопротивления зернистой шероховатости речного дна имеет вид формулы (2), где угловой коэффициент в уравнении регрессии оказывается примерно таким же, как это было установлено А. П. Зегждой в экспериментах, а величина свободного члена оказывается меньше, чем в гидравлическом лотке.

Согласно имеющимся материалам исследований, на реках величина свободного члена в формуле (2) изменяется в пределах от 6,01 у Зегжды (по данным измерений в лотках с закрепленной песчаной шероховатостью) до –5,3 у К. В. Гришанина [15] (по данным измерений на предгорных участках рек с галечно-валунным дном). Такая тенденция часто отмечается при попытках использования расчетных зависимостей, полученных в экспериментальных условиях для выполнения гидравлических расчетов естественных участков речных русел рек. Это связано, с одной стороны, с неоднородностью грунтов донных отложений в естественных условиях, с другой — с наличием факторов, оказывающих дополнительное сопротивление движению воды в реках.

Разнородность грунта донных отложений в реальных условиях можно учесть за счет оценки распределения крупности гранулометрического состава при установлении репрезентативного диаметра донных частиц речного аллювия. В работе Дж. Рибберинка [4], результаты которой также использовались впоследствии другими авторами [6], [7], применялся логарифмически-нормальный закон распределения крупности частиц донных отложений. Эти данные позволили определить эффективную высоту выступов шероховатости на дне потока в зависимости от среднего диаметра частиц грунта в смеси $K'_s = d_m + 1,65 S_{dm}$, где $S_{dm} = \sqrt{\sum \beta_i (d_i - d_m)^2}$.

Значительно более сложным оказывается оценить другие составляющие дополнительных гидравлических сопротивлений движению воды в реках. Природа дополнительных факторов в реальных условиях может оказаться различной. На характеристики движения воды оказывает влияние форма речного русла, наличие русловых морфологических образований: гряд, перекатов, побочней и др. На дне реки, сложенном неоднородным грунтом, могут образовываться случайные скопления из относительно более крупных частиц.

Представляются перспективными в плане совершенствования расчетного обоснования результаты исследований, в которых величина сопротивления зернистой шероховатости дна выделялась в виде функции полного сопротивления по длине потока. Дж. Гриффитс в своей работе [16] использовал материалы натурных измерений на реках с крупнозернистыми грунтами донных отложений. С привлечением данных других авторов он получил эмпирическую расчетную зависимость, в которой величина полного сопротивления по длине оказалось функционально связанной с сопротивлением зернистой шероховатости дна и величиной критического касательного напряжения на дне потока

$$\Theta_r \equiv \tau_{*r} = \tau_* - \tau_{*d} = \exp(-b\tau_*^{-m}) (\tau_* - \tau_{*d}), \quad (4)$$

где $b = 0,142$ и $m = 0,71$ — коэффициенты регрессии в формуле Гриффитса.

Кроме приведенных ранее формул коэффициента Шези, для оценки зернистой шероховатости дна в реках в настоящей работе был выполнен анализ результатов исследований Ялина [5], Энгелунда [17] и Карима [18], а также использованы результаты последних исследований в данной области [19]–[22]. Для выполнения тестовых расчетов в работе использовалась выборка исходных данных измерений на гидрологических постах, включающая одновременные измерения гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла на 41 гидрометрическом створе по 29 различным рекам. Общая характеристика используемой выборки приведена в работах [7], [8].

Результаты (Results)

На основе имеющейся выборки исходных данных было выполнено тестирование различных формул для оценки гидравлических сопротивлений в естественных руслах. Учитывая, что каждая из анализируемых расчетных зависимостей содержит эмпирические коэффициенты, значения

которых зависят от условий проведения исследований в каждом конкретном случае, эта работа проводилась в два этапа.

На первом этапе отдельные формулы для вычисления зернистой шероховатости русла были сопоставлены между собой. При таком подходе имеет место некоторая условность, так как выделить относительную долю зернистой шероховатости в чистом виде не представляется возможным, и нет ясности, какую из анализируемых в работе формул считать базовой для сравнения. В этой связи был проведен второй этап расчетов, в ходе которого вычислялись значения расходов влекомых наносов. Полученные значения сопоставлялись с соответствующими измеренными расходами наносов и, таким образом, уточнялись величины эмпирических коэффициентов в применяемых формулах коэффициента Шези. Это позволило внести определенность при оценке полученных результатов и наметить дальнейшие шаги для проведения исследований в данной области. На рис. 1 показано сопоставление результатов вычисления значений коэффициента подвижности Θ_d , рассчитанных по формулам Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды.

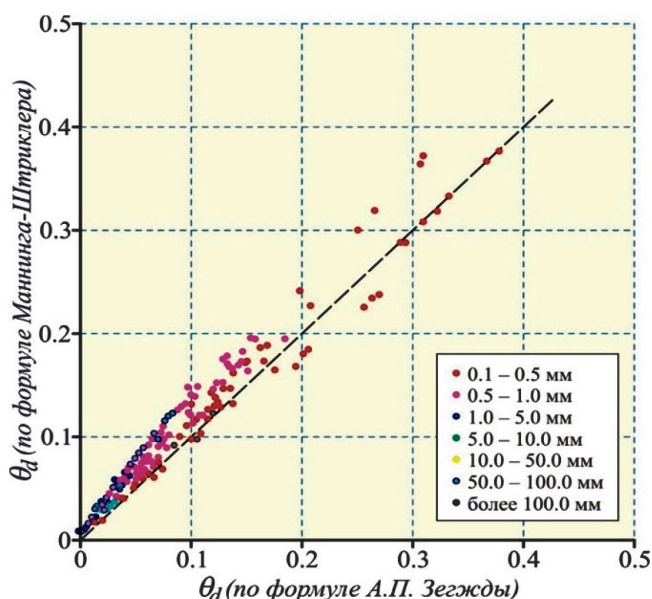


Рис. 1. Сопоставление результатов расчета параметра Θ_d по формулам Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды

Полученные данные показывают, что результаты вычисления значений коэффициента подвижности по этим формулам достаточно хорошо совпадают между собой. При этом в области малых значений коэффициента подвижности, т. е. для относительно более крупных частиц, формула Маннинга – Штриклера в вычислениях дает завышенные значения Θ_d по сравнению с формулой Зегжды.

На основе выполненных расчетов с использованием имеющейся выборки исходных данных были построены графики зависимости $\Theta_d = f(\Theta)$. При этом величина Θ_d в каждом конкретном случае вычислялась по разным формулам коэффициента Шези для оценки зернистой шероховатости дна. В вычислениях использовались расчетные формулы Маннинга – Штриклера [12], Зегжды [13], Гриффитса [16], Ялина [5], Энгелунда [17] и Карима [18]. Сопоставление результатов выполненных расчетов приведено на рис. 2. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Как и следовало ожидать, наиболее близкие результаты между собой дали формулы Маннинга – Штриклера и Зегжды. При этом число значений, попавших в область $\Theta_d \geq \Theta$ по формуле Зегжды оказалось меньше, чем по формуле Штриклера. Это свидетельствует о том, что расчетная формула Зегжды при прочих равных условиях будет давать более точные результаты вычислений в области малых значений коэффициента подвижности, чем расчетная формула Штриклера.

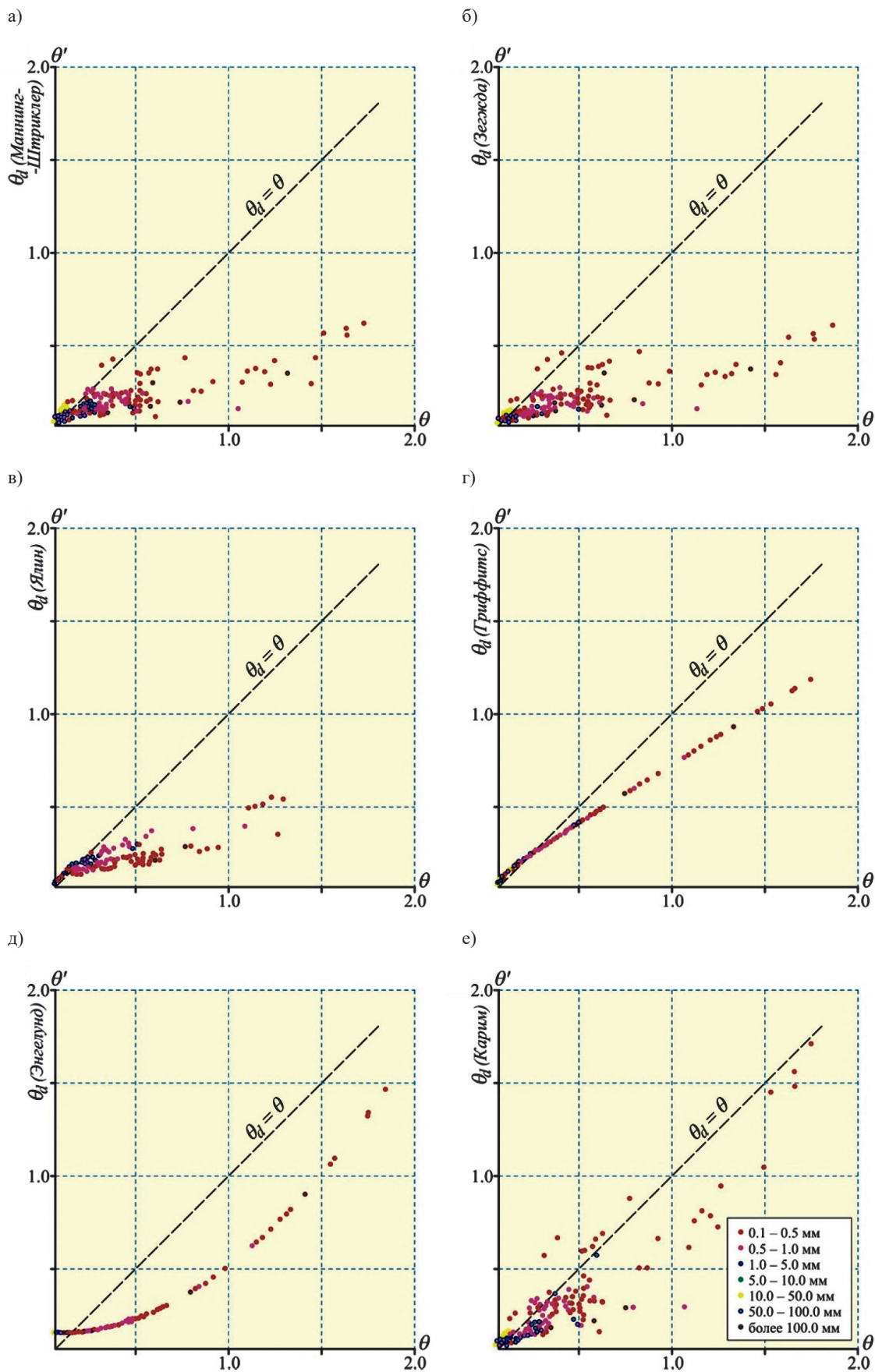


Рис. 2. Графики зависимости $\theta_d = f(\theta)$:

а — формула Маннинга – Штриклера; б — формула А. П. Зегжды; в — формула М. Ялина;
г — формула Дж. Гриффитса; д — формула Энгелунда; е — формула Карима

Результаты расчетов, выполненных с использованием методики Ялина, достаточно хорошо коррелируют с данными, полученными по первым двум формулам, однако эта методика дает также завышенные значения Θ_d в области малой подвижности частиц. При вычислении высоты гряд по Ялину используется дополнительный параметр — критическое значение коэффициента подвижности Θ_{cm} . В рассматриваемом случае его величина находилась на основе расчетной зависимости, построенной на основе экспериментальных исследований В. С. Кнороза [8], [11].

Установленная Гриффитсом аналитическая зависимость $\Theta_d = f(\Theta)$, судя по полученным данным, завышает относительную долю зернистой шероховатости. В наибольшей степени это проявляется в области больших значений коэффициента подвижности, т. е. применительно к частицам мелкой крупности. Рассчитанная величина Θ_d по этой формуле практически во всем диапазоне существенно больше значений, полученных по формулам Штриклера, Зегжды и Ялина. По всей видимости, при вычислении величины расхода наносов с использованием данной расчетной зависимости необходимо корректировать полученное автором значение свободного члена в уравнении регрессии.

График зависимости $\Theta_d = f(\Theta)$, построенный на основе вычислений по формуле Энгелунда, имеет обратную кривизну по сравнению с остальными анализируемыми формулами. Физически обосновать это трудно, и для принятия решения относительно возможного использования этой формулы в расчетах в дальнейшем необходимо привлечение дополнительных экспериментальных и натурных данных для проведения тестовых расчетов.

На графике, полученном на основе вычислений по формуле Карима, отчетливо просматриваются области, разделяющие степень подвижности мелких и относительно более крупных частиц. Это связано, по-видимому, с тем, что исходная формула Карима тестировалась по данным измерений на реках с мелкозернистыми грунтами. Но даже и для этих фракций разброс точек на графике оказался достаточно большим.

Для оценки точности вычисления расхода влекомых наносов с использованием выбранных расчетных зависимостей и последующей оценки потерь энергии по длине в работе был выполнен второй этап расчетов, в ходе которого результаты вычислений сопоставлялись с данными натурных измерений на реках.

Обсуждение (Discussion)

В качестве базовой модели, используемой для тестирования расхода наносов, применялась модифицированная формула Л. ван Рейна, описание которой приводится в работе [8]. Полученная формула записывается в виде

$$q_s = AHU Fr^{2.4} \sum_{i=1}^n \beta_i \left(\frac{1 - \sqrt{\xi_i \Theta_{ci} / \mu \Theta_i}}{\sqrt{\rho_s / \rho - 1}} \right)^{2.4}. \quad (5)$$

В ходе выполняемых вычислений значения параметра $\Theta_d = \mu \Theta_i$ определялись по всем описанным ранее расчетным формулам, что позволило в каждом конкретном случае оценить долю зернистой шероховатости и при необходимости внести необходимые коррективы при определении ее величины. Объективным критерием качества работы той или иной расчетной формулы для оценки зернистой шероховатости русла служило сопоставление рассчитанных значений величины расхода наносов с данными натурных измерений. При выполнении тестовых расчетов внимание также обращалось на то, что используемая расчетная модель содержит эмпирические коэффициенты. Учитывая, что все эти параметры взаимосвязаны между собой и каждый из них, в той или иной степени, оказывает влияние на надежность получения окончательного результата, желательно было сохранить авторскую трактовку составляющих модель блоков вычислений. К ним относятся прежде всего общая структура расчетной формулы Л. ван Рейна, полученные угловые коэффициенты регрессии, и, наконец, методика оценки *hiding*-эффекта. Эти вопросы в достаточной степени были проанализированы на предыдущем этапе исследований и к настоящему времени пока не получено аргументов, опровергающих их.

Вычисления по формулам Маннинга – Штриклера и Зегжды показали, что при использовании в расчетной формуле расхода наносов по Л. ван Рейну значения свободного члена $A = 0,001$ качество вычисления расхода наносов становится выше, чем это было получено на предыдущем этапе исследования при $A = 0,0014$. При этом расчеты, выполненные на основе формулы Штриклера, дают наилучшие результаты в авторской трактовке формулы. Величина свободного члена в формуле Зегжды получилась равной 1,0, что совпадает с результатом, полученным ранее Лимериносом.

По всем остальным расчетным формулам вычисления были выполнены для этих двух случаев, т. е. при $A = 0,0014$ и $A = 0,001$, а корректировке подлежали лишь коэффициенты пропорциональности в соответствующих формулах потерь энергии по длине при оценке доли зернистой шероховатости русла. Результаты выполненных расчетов показали, что при использовании расчетных зависимостей Гриффитса, Энгелунда и Карима для вычисления расхода влекомых наносов авторские значения эмпирических коэффициентов в этих формулах приходится корректировать с целью повышения качества вычислений.

Выводы (Summary)

Для использования полученных результатов при выполнении гидравлических расчетов и моделировании русловых переформирований в реках на основе выполненных в этой работе исследований можно сделать следующие выводы:

1. При выполнении гидравлических расчетов с целью определения отметок свободной поверхности по длине реки с крупнозернистыми донными отложениями рекомендуется использовать расчетные зависимости типа Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды. При наличии измеренных уклонов свободной поверхности необходимо провести серию тестовых расчетов для уточнения величины свободного члена в исходной зависимости либо величины эффективной высоты выступов шероховатости на дне речного потока, что позволит учесть дополнительные факторы сопротивления движению воды.

2. На участках рек с подвижными мелкозернистыми грунтами донных отложений более предпочтительным оказывается использование в расчетах отметок свободной поверхности новых зависимостей гидравлического сопротивления по длине, полученных на основе установленной связи коэффициента Шези от скорости течения воды [8], [15], [23]. Структура этих формул позволяет учесть механизм обратной связи в системе *речной поток – подвижное русло* и на этой основе более надежно оценивать реакцию речного потока в виде естественных и искусственных изменений речного русла.

3. При моделировании транспорта наносов и расчете русловых деформаций в реках целесообразно использовать расчетные зависимости коэффициента Шези, полученные для оценки зернистой шероховатости донных отложений, либо зависимости вида $\Theta_d = f(\Theta)$, построенные по материалам натурных исследований. В последнем случае необходимо иметь сведения об измеренных уклонах свободной поверхности по длине реки, что позволяет выделить относительную долю зернистой шероховатости дна из полной величины потерь энергии по длине.

4. Выполненные расчеты показали, что при наличии измеренных уклонов свободной поверхности на исследуемом участке реки с подвижными грунтами донных отложений из всех рассмотренных вариантов тестовых расчетов наилучшие результаты в сопоставлении с данными измерений расхода влекомых наносов дает модифицированная формула (5) Л. ван Рейна. Величина свободного члена в этой формуле $A = 0,0014$ при использовании методики Эйнштейна – Ялина для оценки грядовой составляющей коэффициента Шези и методики Ашида – Егиазарова – Зенгена [3]–[6] для пофракционного вычисления расхода разнотекучих наносов.

5. Результаты вычислений, выполненных на основе расчетных формул для оценки зернистой шероховатости дна с помощью формул Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды показали, что применение данных формул для определения величины коэффициента подвижности Θ_d в формуле расхода влекомых наносов может быть рекомендовано при отсутствии измерений уклона

свободной поверхности. При использовании формулы Л. ван Рейна (5) в качестве модели транспорта наносов в данном случае величина свободного члена составила $A = 0,001$. При этом формула Маннинга – Штриклера может использоваться в авторской трактовке, а в формуле А. П. Зегжды величину свободного члена следует принять равной 1,0.

6. Группа расчетных зависимостей, построенная на использовании функциональной связи вида $\Theta_d = f(\Theta)$, установленной Гриффитсом, Энгелундом и Каримом, позволяет повысить качество моделирования транспорта наносов. Точность вычислений по этим формулам примерно одинакова, однако остается ниже, чем по формулам Эйнштейна – Ялина. На основе результатов тестирования, выполненного при оценке относительной доли зернистой шероховатости по этим формулам, в дальнейшем необходимо исследовать возможность их использования в расчетной практике с учетом необходимости корректировки авторских значений коэффициентов в уравнениях регрессионного анализа. Это позволяет выполнить дальнейшее усовершенствование модели транспорта наносов с целью повышения качества и надежности русловых прогнозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyer-Peter E. Formulas for bed-load transport / E. Meyer-Peter, R. Muller // Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research. — Delft, 1948. — Pp. 39–64.
2. Shields A. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebe Bewegung: Diss. / A. Shields. — Berlin, 1936. — 26 p.
3. Egiazaroff I. V. Calculation of nonuniform sediment concentrations / I. V. Egiazaroff // Journal of the Hydraulics Division. — 1965. — Vol. 91. — Is. 4. — Pp. 225–247.
4. Ribberink J. S. Mathematical modelling of one dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment. Report №.87-2 / J.S. Ribberink // Delft University of Technology, 1987. — 202 p.
5. Yalin M.S. Steepness of sedimentary dunes / M. S. Yalin, E. Karahan // Journal of the Hydraulics Division. — 1979. — Vol. 105. — Is. 4. — Pp. 381–392.
6. Söhngen B. Modelling of the Danube and Isar rivers morphological evolution. Part 1: Measurements and Formulation / B. Söhngen, Y. Kellerman, G. Loy // Proc. 5th Int. Symp. on River Sedimentation, Karlsruhe. — 1992. — Vol. 3. — Pp. 1175–1207.
7. Gladkow G.L. Modellierung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen / G.L. Gladkow, B. Söhngen // Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. — Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2000. — Nr. 82. — Pp. 123–130.
8. Гладков Г. Л. Гидравлическое сопротивление движению воды и транспорт наносов в реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.
9. Einstein H.A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows / H.A. Einstein // Technical Bulletin. — U.S. Dept. of Agriculture, 1950. — No. 1026.
10. Van Rijn L.C. Sediment transport, Part 1: Bed load transport / L.C. Van Rijn // Journal of Hydraulic Engineering. — 1984. — Vol. 110. — Is. 10. — Pp. 1431–1456. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431)
11. Кнороз В. С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие / В.С. Кнороз // Изв. ВНИИГ. — 1958. — Т. 59. — С. 62–81.
12. Stricler A. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen / A. Stricler // Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft. — 1923. — № 16.
13. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах / А.П. Зегжда. — Л., М.: Госстройиздат, 1957. — 276 с.
14. Griffiths G. A. Flow resistance in coarse gravel bed rivers / G. A. Griffiths // Journal of the Hydraulics Division. — 1981. — Vol. 107. — Is. 7. — Pp. 899–918.
15. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К.В. Гришанин. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 с.
16. Griffiths G. A. Form resistance in gravel channels with mobile beds / G. A. Griffiths // Journal of Hydraulic Engineering. — 1989. — Vol. 115. — Is. 3. — Pp. 340–355.

17. Engelund F. Hydraulic resistance of alluvial streams / F. Engelund // *Journal of the Hydraulics Division*. — 1966. — Vol. 92. — Is. 2. — Pp. 315–326.
18. Karim F. Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flows / F. Karim // *Journal of Hydraulic Engineering*. — 1995. — Vol. 121. — Is. 1. — Pp. 15–25. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:1(15)
19. Yang S. Q. Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel / S. Q. Yang, S. K. Tan, S. Y. Lim // *Water resources research*. — 2005. — Vol. 41. — Is. 9. DOI: 10.1029/2005WR004211.
20. Самохвалова О. А. Дифференцированный подход к расчету расхода донных наносов в реках / О. А. Самохвалова // *Современные проблемы науки и образования*. — 2015. — № 1-2. — С. 269.
21. Ferguson R. I. Flow resistance and hydraulic geometry in contrasting reaches of a bedrock channel / R. I. Ferguson, B. P. Sharma, R. J. Hardy, R. A. Hodge, J. Warburton // *Water Resources Research*. — 2017. — Vol. 53. — Is. 3. — Pp. 2278–2293. DOI: 10.1002/2016WR020233.
22. Stewart M. T. Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds / M.T. Stewart, S. M. Cameron, V. I. Nikora, A. Zampiron, I. Marusic // *Journal of Hydraulic Research*. — 2019. — Vol. 57. — Is. 2. — Pp. 183–196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296.
23. Гладков Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: Монография / Г.Л. Гладков, Р.С. Чалов, К.М. Беркович. — 2 изд., стер. — СПб.: Издательство Лань, 2019. — 432 с.

REFERENCES

1. Meyer-Peter, Eugen, and R. Müller. “Formulas for bed-load transport.” *Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*. Delft, 1948. 39–64.
2. Shields, Albert. *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebe Bewegung*. Diss. Berlin, 1936.
3. Egiazaroff, I. V. “Calculation of nonuniform sediment concentrations.” *Journal of the Hydraulics Division* 91.4 (1965): 225–247.
4. Ribberink, Jan S. *Mathematical modelling of one dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment*. Report №87-2. Delft University of Technology, 1987.
5. Yalin, Mehmet Selim, and Emin Karahan. “Steepness of sedimentary dunes.” *Journal of the Hydraulics Division* 105.4 (1979): 381–392.
6. Söhngen, B., J. Kellermann, G. Loy, and P. Belleudy. “Modelling of the Danube and Isar Rivers morphological evolution. Part I: Measurements and formulation.” *Proc. 5th Int. Symp. On River Sedimentation, Karlsruhe*. Vol. 3. 1992. 1175–1207.
7. Gladkov, G.L., and B. Söhngen. “Modellirung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen.” *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*. Nr. 82. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2000. 123–130.
8. Gladkov, Gennadii L., and Michail V. Zhuravlev. “Hydraulic resistance to water flow and sediment transport in rivers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.
9. Einstein, H. A. “The bed-load function for sediment transportation in open channel flows.” *Technical Bulletin*. No. 1026. U. S. Dept. of Agriculture, 1950.
10. Van Rijn, Leo C. “Sediment transport, Part 1: Bed load transport.” *Journal of Hydraulic Engineering* 110.10 (1984): 1431–1456. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431).
11. Knoroz, V. S. “Nerazmyvayushchaya skorost' dlya nesvyaznykh gruntov i faktory, ee opredelyayushchie.” *Izv. VNIIG* 59 (1958): 62–81.
12. Stricler, A. “Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauchigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen.” *Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft* 16 (1923).
13. Zegzhda, A.P. *Gidravlicheskie poteri na trenie v kanalakh i truboprovodakh*. L., M.: Gosstroizdat, 1957.
14. Griffiths, George A. “Flow resistance in coarse gravel bed rivers.” *Journal of the Hydraulics Division* 107.7 (1981): 899–918.
15. Grishanin, K. V. *Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992.
16. Griffiths, George A. “Form resistance in gravel channels with mobile beds.” *Journal of Hydraulic Engineering* 115.3 (1989): 340–355.
17. Engelund, Frank. “Hydraulic resistance of alluvial streams.” *Journal of the Hydraulics Division* 92.2 (1966): 315–326.

18. Karim, Fazle. "Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 121.1 (1995): 15–25. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:1(15).
19. Yang, Shu-Qing, Soon-Keat Tan, and Siow-Yong Lim. "Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel." *Water resources research* 41.9 (2005). DOI: 10.1029/2005WR004211.
20. Samokhvalova, O. A. "Selective approach for bedload discharge calculations in rivers." *Modern problems of science and education* 1-2 (2015): 269.
21. Ferguson, R. I., B. P. Sharma, R. J. Hardy, R. A. Hodge, and J. Warburton. "Flow resistance and hydraulic geometry in contrasting reaches of a bedrock channel." *Water Resources Research* 53.3 (2017): 2278–2293. DOI: 10.1002/2016WR020233.
22. Stewart, Mark T., Stuart M. Cameron, Vladimir I. Nikora, Andrea Zampiron, and Ivan Marusic. "Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds." *Journal of Hydraulic Research* 57.2 (2019): 183–196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296.
23. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. 2nd. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гладков Геннадий Леонидович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gladkov, Gennadii L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 18 марта 2020 г.
Received: March 18, 2020.*

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-347-358

STABILITY OF EXTERNAL CANTILEVER ELEMENTS OF DEEP-SEA VEHICLES

S. O. Baryshnikov, M. V. Sukhoterin, T. P. Knysh

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

In this paper, the deformation of a rectangular cantilever plate under conditions of complex bending, when a uniform transverse load acts on its surface, and a uniform compressive load is applied to the parallel free edges in the plane of the plate, is determined.

Cantilever plates are widely used in aviation, rocket technology, astronautics, military shipbuilding, civil engineering (cantilever plates) and other industries. Most often, the plate is loaded with a transverse load (uniform, concentrated, etc.) and under its influence experiences bending deformations. In the cantilever thin external elements of deep-sea vehicles (submarines, deep-sea torpedoes, bathyscaphes), the compressive load from the water pressure in the plate plane, applied to its free edges, can be significant and causes stability loss.

The problem is described by a system of fourth-order partial differential equations with respect to the desired deflection function. As a parameter, the basic bending equation contains a uniformly distributed compressive force. The deflection function is obtained during the iterative process of superposition of the two main correcting functions in the form of hyperbolic-trigonometric series over two coordinates. These functions in turn compensate for the residuals of the boundary conditions from each of them. The criterion for the end of the iterative process is the desire to zero all residuals. The search for the first and subsequent critical loads is carried out by iterating the load value until a new stable form of equilibrium appears. The spectrum of the first few critical loads is given and the corresponding equilibrium forms are presented.

Keywords: Deep-sea vehicles, stability, cantilever plates, iteration process, Fourier series, the critical load, the shape of the equilibrium.

For citation:

Baryshnikov, Sergej O., Mikhail V. Sukhoterin, and Tat'yana P. Knysh. "Stability of external cantilever elements of deep-sea vehicles." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 347–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-347-358.

УДК 629.12:624.04

УСТОЙЧИВОСТЬ ВНЕШНИХ КОНСОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГЛУБОКОВОДНЫХ АППАРАТОВ

С. О. Барышников, М. В. Сухотерин, Т. П. Кныш

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В данном исследовании определяется деформация прямоугольной консольной пластины в условиях сложного изгиба, когда на ее поверхности действует равномерная поперечная нагрузка, а на параллельных свободных краях приложена равномерная сжимающая нагрузка в плоскости пластины. Консольные пластины широко применяются в различных отраслях техники, в том числе в военном и гражданском судостроении. Отмечается, что чаще всего такие пластины нагружены поперечной нагрузкой (равномерной, сосредоточенной и т. д.), под воздействием которой они испытывают изгибные деформации. В консольных тонких наружных элементах глубоководных аппаратов (подводные лодки, глубоководные торпеды, батискафы) сжимающая нагрузка от давления воды в плоскости пластины, приложенная к ее свободным краям, может быть значительной и вызвать потерю устойчивости. Задача устойчивости описывается в работе системой дифференциальных уравнений четвертого порядка в частных производных относительно

искомой функции прогибов. В качестве параметра основное уравнение изгиба содержит равномерно распределенное давление на боковые свободные края пластины. Функция прогибов получена в результате итерационного процесса суперпозиции двух основных исправляющих функций в виде гиперболо-тригонометрических рядов по двум координатам. Эти функции поочередно компенсируют невязки выполнения граничных условий от каждой из них. Критерием окончания итерационного процесса является стремление к нулю всех невязок. Поиск первой и последующих критических нагрузок осуществляется перебором величины нагрузки до появления новой устойчивой формы равновесия. Получен спектр нескольких первых критических нагрузок и представлены соответствующие им формы равновесия.

Ключевые слова: глубоководные аппараты, устойчивость, консольные пластины, итерационный процесс, ряды Фурье, критические нагрузки, формы равновесия.

Для цитирования:

Барышников С. О. Устойчивость внешних консольных элементов глубоководных аппаратов / С. О. Барышников, М. В. Сухотерин, Т. П. Кныш // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 347–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-347-358.

Введение (Introduction)

Консольные пластины прямоугольной (или почти прямоугольной) формы используются в глубоководных аппаратах в качестве стабилизаторов. На пластину в горизонтальном положении действует выталкивающая сила, из-за разности давлений на нижней и верхней поверхностях, которую можно считать равномерно распределенной нагрузкой, приложенной к одной из ее поверхностей. К свободным краям приложена равномерная сжимающая нагрузка в плоскости пластины, которой обычно пренебрегают при небольших глубинах погружения [1]. На больших глубинах сжимающие усилия могут достигать значительной величины и вызывать потерю устойчивости консольного элемента. Если пластина обладает высокой упругостью, то она может быстро пройти критическое состояние, сопровождающееся резким ростом прогибов, и перейти в закритическое состояние к новой устойчивой форме равновесия. Теоретически для абсолютно упругих пластин существует бесконечно большое число критических нагрузок и соответствующих форм равновесия, однако на практике ограничиваются либо поиском только первой (Эйлеровой) критической нагрузки, которую считают разрушающей для пластин из обычных материалов, либо двух-трех последующих для пластин из высокоупругих материалов.

Задачи изгиба и устойчивости консольных пластин являются наименее изученными с точки зрения получения аналитических или численно-аналитических решений, ввиду сложности краевой задачи математической физики. Если решение основного дифференциального уравнения изгиба сравнительно нетрудно найти, то точно удовлетворить всем граничным условиям, содержащим частные производные до третьего порядка включительно, не представляется возможным. Поэтому исследователи разрабатывают различные приближенные методы, точность которых требует специального анализа. Критерием точности является, безусловно, проверка выполнения всех граничных условий, основным из которых является следующее: невязки должны быть достаточно малы, однако именно эта проверка для большинства численных решений (МКЭ, МКР и т. п.) сопряжена с большими трудностями, так как эти методы «работают» с массивами чисел, а не с аналитическими выражениями. Одними из немногих работ, в которых энергетическим методом получены численные результаты для первой критической нагрузки прямоугольной консольной пластины, сжимающейся по свободным краям, являются работы [2], [3], в которых рассматривались различные виды сжимающей нагрузки. В работе [2] распределенная сжимающая нагрузка была приложена лишь к краю, противоположному заделке. В работе [3] сжимались края, перпендикулярные заделке, а край, параллельный ей, был свободен от нагрузки. На поверхности пластины не действовала также поперечная нагрузка. Проблеме устойчивости консольно-защемленной консоугольной неоднородной пластины в сверхзвуковом потоке газа посвящена статья [4], где собственные числа находились с использованием вариационного принципа Гамильтона и МКЭ.

В работах [5]–[8] исследуется устойчивость защемленной по контуру прямоугольной пластины с использованием гиперголо-тригонометрических рядов по двум координатам. В работах [5]–[7] поперечная нагрузка не рассматривается и проблема сводится к бесконечной однородной системе алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов рядов. В качестве параметра фигурирует сжимающая нагрузка, перебирая величину которой находились критические нагрузки и соответствующие формы равновесия. В работе [8] исследован случай сложного изгиба от поперечной нагрузки и сжатия в плоскости пластины. Задача решалась итерационным методом суперпозиции исправляющих функций, используемым и в настоящей работе. Работы [9], [10] посвящены применению различных энергетических методов для решения задач изгиба и устойчивости прямоугольных пластин.

Целью настоящей работы является разработка эффективного метода численного моделирования устойчивости конструктивных элементов принципиально новых судов и кораблей, в том числе из новых материалов. Задачей исследования является определение спектра критических сжимающих нагрузок и соответствующих форм закритического равновесия внешних прямоугольных консольных элементов глубоководных аппаратов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим прямоугольную консольную пластину, нагруженную равномерной поперечной нагрузкой интенсивности q_0 и равномерными сжимающими усилиями T_x в плоскости пластины, приложенными к параллельным свободным краям (рис. 1). Сжимающие усилия, которые в реальных условиях приложены к свободному краю, параллельному заделке, в данном случае не учитываются, оставляя эту задачу для дальнейших исследований.

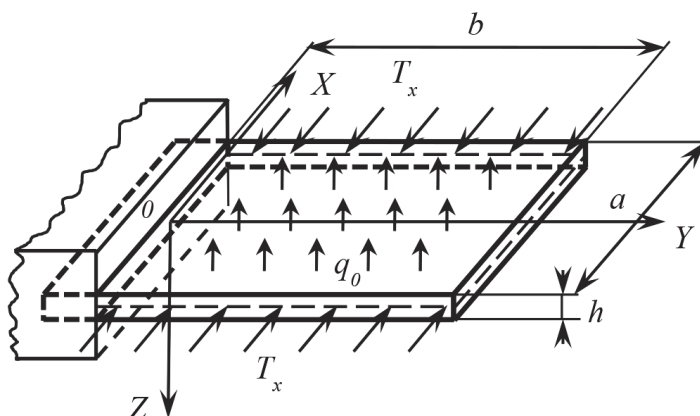


Рис. 1. Консольная пластина в условиях сложной нагрузки

Дифференциальное уравнение изгиба такой пластины имеет вид [11]:

$$D\nabla^2\nabla^2W + T_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} = -q_0, \quad (1)$$

где W — прогиб срединной поверхности пластины; $D = Eh^3/[12(1 - \nu^2)]$ — цилиндрическая жесткость пластины; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; ∇^2 — двумерный оператор Лапласа.

Заметим, что для растягивающих усилий в уравнении (1) перед вторым слагаемым следует изменить знак. Перейдем к безразмерным координатам $x = X/b$, $y = Y/b$. Тогда уравнение (1) запишется в виде

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

где $w = WD/(q_0b^4)$ — относительный прогиб; $T = T_x b^2/D$ — относительные сжимающие усилия, приложенные к параллельным свободным краям.

Относительные размеры пластины будут следующие: $-\gamma/2 \leq x \leq \gamma/2$, $0 \leq y \leq 1$, где $\gamma = a/b$.
Граничные условия [11]:

$$[w]_{y=0} = 0, \quad \left[\frac{\partial w}{\partial y} \right]_{y=0} = 0; \quad (3)$$

$$\begin{cases} [M_y]_{y=1} = - \left[\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right]_{y=1} = 0; \\ [V_y]_{y=1} = - \left[\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right]_{y=1} = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} [M_x]_{x=\pm\gamma/2} = - \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right]_{x=\pm\gamma/2} = 0; \\ [V_x]_{x=\pm\gamma/2} = - \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right]_{x=\pm\gamma/2} = 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$[H_{xy}]_{y=1} = - (1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right]_{y=1} = 0. \quad (6)$$

Здесь изгибающие моменты M_x , M_y и крутящий момент H_{xy} отнесены к величине $q_0 b^2$, а перерезывающие силы V_x , V_y — к величине $q_0 b$.

Задача сложного изгиба формулируется следующим образом: найти функцию прогибов $w(x, y)$, удовлетворяющую уравнениям (2)–(6), а также спектр критических усилий T , при которых пластина теряет устойчивость, приобретая затем новые формы равновесия. Заметим, что усилия T в плоскости пластины могут быть и растягивающими. Тогда задача будет более простой, не связанной с потерей устойчивости.

В качестве частного решения дифференциального уравнения (2) возьмем известное «балочное» решение (консольная балка):

$$w_0(y) = -\frac{1}{24}(y^4 - 4y^3 + 6y^2). \quad (7)$$

Эта функция удовлетворяет всем граничным условиям за исключением первого условия (5), т. е. на свободных краях $x = \pm\gamma/2$ дает «невязку» в виде изгибающего момента M_x . Величина этой невязки, которую назовем *начальной*, имеет вид

$$M_{x0}\left(\pm\frac{\gamma}{2}, y\right) = \frac{\nu}{2}(y-1)^2. \quad (8)$$

Ее можно устранить добавлением к балочному решению дополнительной исправляющей функции, которая бы удовлетворяла соответствующему однородному уравнению (2), а также (за счет неопределенных коэффициентов) граничным условиям на краях $x = \pm\gamma/2$, поглощая невязку (8), разложив которую в ряд Фурье по $\sin \lambda_k y$, где $\lambda_k = k\pi/2$, получим:

$$M_{x0}\left(\pm\frac{\gamma}{2}, y\right) = \frac{\nu}{2}(y-1)^2 = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} b_{k0} \sin \lambda_k y. \quad (9)$$

Здесь

$$b_{k0} = \frac{\nu}{\lambda_k} \left(1 - \frac{2}{\lambda_k^2} \right). \quad (10)$$

Первую исправляющую функцию выберем в виде

$$w_1(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} A_k \cosh(\alpha_k x) \sin(\lambda_k y). \quad (11)$$

Здесь A_k, α_k — неопределенные коэффициенты.

Необходимо, чтобы ряд (11) удовлетворял однородному дифференциальному уравнению

$$\nabla^2 \nabla^2 w + T \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (12)$$

Тогда для коэффициентов α_k получим биквадратное уравнение

$$\alpha_k^4 - 2\alpha_k^2 \lambda_k^2 + \lambda_k^4 + T \alpha_k^2 = 0, \quad (13)$$

имеющее четыре корня, из которых, в силу четности гиперболической функции, понадобятся два:

$$\alpha_k = \sqrt{0,5(2\lambda_k^2 - T + \sqrt{T^2 - 4\lambda_k^2 T})}; \quad \beta_k = \sqrt{0,5(2\lambda_k^2 - T - \sqrt{T^2 - 4\lambda_k^2 T})}. \quad (14)$$

С учетом выражений (14) функция (11) примет вид

$$w_1(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} [A_k \cosh(\alpha_k x) + B_k \cosh(\beta_k x)] \sin(\lambda_k y), \quad (15)$$

где неопределенные коэффициенты можно определить при удовлетворении граничным условиям (5) из системы двух линейных уравнений:

$$\begin{cases} A_k (\alpha_k^2 - \nu \lambda_k^2) \cosh(\tilde{\alpha}_k) + B_k (\beta_k^2 - \nu \lambda_k^2) \cosh(\tilde{\beta}_k) = b_{k0}; \\ A_k \alpha_k [\alpha_k^2 - (2 - \nu) \lambda_k^2] \sinh(\tilde{\alpha}_k) + B_k \beta_k [\beta_k^2 - (2 - \nu) \lambda_k^2] \sinh(\tilde{\beta}_k) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Здесь $\tilde{\alpha}_k = \alpha_k \gamma / 2$, $\tilde{\beta}_k = \beta_k \gamma / 2$.

Запишем эти коэффициенты:

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{\beta_k [\beta_k^2 - (2 - \nu) \lambda_k^2] \sinh(\tilde{\beta}_k) \cdot b_{k0}}{\delta_k}; \\ B_k &= -\frac{\alpha_k [\alpha_k^2 - (2 - \nu) \lambda_k^2] \sinh(\tilde{\alpha}_k) \cdot b_{k0}}{\delta_k}. \end{aligned} \quad (17)$$

В выражениях (17) знаменатель

$$\begin{aligned} \delta_k &= (\alpha_k^2 - \nu \lambda_k^2) \beta_k [\beta_k^2 - (2 - \nu) \lambda_k^2] \cosh(\tilde{\alpha}_k) \sinh(\tilde{\beta}_k) - \\ &- (\beta_k^2 - \nu \lambda_k^2) \alpha_k [\alpha_k^2 - (2 - \nu) \lambda_k^2] \sinh(\tilde{\alpha}_k) \cosh(\tilde{\beta}_k). \end{aligned} \quad (18)$$

Функция $w_1(x, y)$ на краях $y = 0$, $y = 1$ порождает невязки по углу поворота заделанного сечения и по изгибающим моментам на противоположном крае, которые необходимо разложить в ряды Фурье по $\cos \mu_s x$, где $\mu_s = 2\pi s / \gamma$:

$$\vartheta_{y1} |_{y=0} = \frac{\partial w_1}{\partial y} |_{y=0} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k [A_k \cosh(\alpha_k x) + B_k \cosh(\beta_k x)] = \vartheta_1 + \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s \vartheta_{s1} \cos \mu_s x. \quad (19)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k \left(\frac{\sinh(\tilde{\alpha}_k)}{\tilde{\alpha}_k} A_k + \frac{\sinh(\tilde{\beta}_k)}{\tilde{\beta}_k} B_k \right), \\ \vartheta_{s1} &= \frac{4}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k \left(\frac{\alpha_k \sinh(\tilde{\alpha}_k)}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} A_k + \frac{\beta_k \sinh(\tilde{\beta}_k)}{\beta_k^2 + \mu_s^2} B_k \right). \end{aligned} \quad (20)$$

$$M_{y1} |_{y=1} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} \left[(\nu \alpha_k^2 - \lambda_k^2) \cosh(\alpha_k x) A_k + (\nu \beta_k^2 - \lambda_k^2) \cosh(\beta_k x) B_k \right] = m_1 + \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s m_{s1} \cos \mu_s x. \quad (21)$$

Здесь

$$m_1 = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} \left[(v\alpha_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\sinh(\tilde{\alpha}_k)}{\tilde{\alpha}_k} A_k + (v\beta_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\sinh(\tilde{\beta}_k)}{\tilde{\beta}_k} B_k \right];$$

$$m_{s1} = \frac{4}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} \left[(v\alpha_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\alpha_k \sinh(\tilde{\alpha}_k)}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} A_k + (v\beta_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\beta_k \sinh(\tilde{\beta}_k)}{\beta_k^2 + \mu_s^2} B_k \right]. \quad (22)$$

$$\tilde{k} = (k+1)/2.$$

Эти невязки также следует компенсировать, но поскольку они содержат свободные члены разложения, сначала для их устранения введем дополнительный двучлен:

$$w_1^*(y) = \frac{1}{2} m_1 y^2 - \vartheta_1 y, \quad (23)$$

который, в свою очередь, порождает невязку на краях $x = \pm\gamma/2$:

$$M_{x1}^*\left(\pm\frac{\gamma}{2}, y\right) = -v \frac{\partial^2 w_1^*}{\partial y^2} = -v m_1. \quad (24)$$

Эту константу следует разложить в ряд Фурье по $\sin \lambda_k y$:

$$M_{x1}^*\left(\pm\frac{\gamma}{2}, y\right) = -v m_1 = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} b_{k1}^* \sin(\lambda_k y), \quad (25)$$

где

$$b_{k1}^* = -\frac{2v m_1}{\lambda_k}.$$

Невязки (19) и (21) в виде рядов будем компенсировать исправляющей функцией второго вида:

$$w_2(x, y) = \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s \left[C_s \sinh(\xi_s(y-1)) + D_s \sinh(\eta_s(y-1)) \right. \\ \left. + E_s \cosh(\xi_s(y-1)) + F_s \cosh(\eta_s(y-1)) \right] \cos \mu_s x. \quad (26)$$

Здесь C_s, D_s, E_s, F_s — неопределенные коэффициенты, с помощью которых будут удовлетворены граничные условия на краях $y = 0, y = 1$; ξ_s, η_s — неопределенные коэффициенты, которым будет удовлетворять уравнение (12).

Для последних коэффициентов аналогично получаем биквадратные уравнения, аналогичные (13):

$$\xi_s^4 - 2\mu_s^2 \xi_s^2 + \mu_s^4 - T\mu_s^2 = 0, \quad \eta_s^4 - 2\mu_s^2 \eta_s^2 + \mu_s^4 - T\mu_s^2 = 0, \quad (27)$$

решения которых

$$\xi_s = \sqrt{\mu_s^2 + \mu_s \sqrt{T}}, \quad \eta_s = \sqrt{\mu_s^2 - \mu_s \sqrt{T}}. \quad (28)$$

Коэффициенты C_s, D_s, E_s, F_s найдутся из системы четырех уравнений:

$$\begin{cases} C_s \sinh(\xi_s) + D_s \sinh(\eta_s) - E_s \cosh(\xi_s) - F_s \cosh(\eta_s) = 0; \\ C_s \xi_s \cosh(\xi_s) + D_s \eta_s \cosh(\eta_s) - E_s \xi_s \sinh(\xi_s) - F_s \eta_s \sinh(\eta_s) = -\vartheta_{s1}; \\ E_s (\xi_s^2 - v\mu_s^2) + F_s (\eta_s^2 - v\mu_s^2) = m_{s1}; \\ C_s \xi_s [\xi_s^2 - (2-v)\mu_s^2] + D_s \eta_s [\eta_s^2 - (2-v)\mu_s^2] = 0. \end{cases} \quad (29)$$

Функция (26), в свою очередь, порождает невязки по изгибающему моменту на краях $x = \pm\gamma/2$, которые разложим в ряд Фурье по синусам:

$$M_{x1}\left(\pm\frac{\gamma}{2}, y\right) = -\left(\frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w_2}{\partial y^2}\right) = \quad (30)$$

$$= \sum_{s=1}^{\infty} \left[C_s (\mu_s^2 - \nu \xi_s^2) \sinh(\xi_s (y-1)) + D_s (\mu_s^2 - \nu \eta_s^2) \sinh(\eta_s (y-1)) \right. \\ \left. + E_s (\mu_s^2 - \nu \xi_s^2) \cosh(\xi_s (y-1)) + F_s (\mu_s^2 - \nu \eta_s^2) \cosh(\eta_s (y-1)) \right] = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \tilde{b}_{k1} \sin \lambda_k y,$$

где

$$\tilde{b}_{k1} = 2 \sum_{s=1}^{\infty} \left[-C_s (\mu_s^2 - \nu \xi_s^2) \frac{(-1)^k \xi_s + \lambda_k \sinh(\xi_s)}{\lambda_k^2 + \xi_s^2} - D_s (\mu_s^2 - \nu \eta_s^2) \frac{(-1)^k \eta_s + \lambda_k \sinh(\eta_s)}{\lambda_k^2 + \eta_s^2} \right. \\ \left. + E_s (\mu_s^2 - \nu \xi_s^2) \frac{\lambda_k \cosh(\xi_s)}{\lambda_k^2 + \xi_s^2} + F_s (\mu_s^2 - \nu \eta_s^2) \frac{\lambda_k \cosh(\eta_s)}{\lambda_k^2 + \eta_s^2} \right].$$

Просуммировав теперь невязки (30) и (25), получим

$$M_{x1}^*\left(\pm\frac{\gamma}{2}, y\right) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} b_{k1} \sin(\lambda_k y), \quad (31)$$

где

$$b_{k1} = \tilde{b}_{k1} + b_{k1}^*.$$

И далее процесс повторяется, т. е. вновь привлекается исправляющая функция первого вида, аналогичная (15):

$$w_{12}(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} [A_{k2} \cosh(\alpha_k x) + B_{k2} \cosh(\beta_k x)] \sin(\lambda_k y), \quad (32)$$

где ее коэффициенты будут представлены в виде:

$$A_{k2} = \frac{\beta_k [\beta_k^2 - (2 - \nu) \lambda_k^2] \sinh(\tilde{\beta}_k) \cdot b_{k1}}{\delta_k}; \quad (33) \\ B_{k2} = -\frac{\alpha_k [\alpha_k^2 - (2 - \nu) \lambda_k^2] \sinh(\tilde{\alpha}_k) \cdot b_{k1}}{\delta_k}.$$

При заданной сжимающей нагрузке T , не превышающей критическую указанным методом суперпозиции исправляющих функций, можно с высокой точностью найти единственное напряженно-деформированное состояние такой пластины, так как граничные условия задачи на каждой итерации удовлетворяются точно, и дело лишь в погрешностях вычислительного процесса с использованием числовых рядов и рядов Фурье. Однако итерационный процесс можно контролировать на каждом шаге, выводя на печать невязки выполнения граничных условий, которые должны убывать по абсолютной величине, приводя к точному решению задачи. Безусловно сходимость итераций должна быть доказана и аналитически, так же как проанализирована сходимость рядов и пригодность их для практических вычислений. Рост сжимающей нагрузки и приближении ее к критической, безусловно, потребует отдельного анализа влияния параметра нагрузки в опасной зоне.

Приведем сводку формул для организации вычислительного итерационного процесса определения функции прогибов консольной пластины в условиях сложного изгиба:

$$w(x, y) = w_0(y) + \sum_n [w_n^*(y) + w_{1n}(x, y) + w_{2n}(x, y)];$$

$$w_0(y) = -\frac{1}{24}(y^4 - 4y^3 + 6y^2), \quad w_n^*(y) = \frac{1}{2} m_{1n} y^2 - \vartheta_{1n} y;$$

$$w_{1n}(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} [A_{kn} \cosh(\alpha_k x) + B_{kn} \cosh(\beta_k x)] \sin(\lambda_k y), \quad \lambda_k = k\pi/2; \quad (34)$$

$$A_{kn} = \frac{\beta_k [\beta_k^2 - (2-\nu)\lambda_k^2] \sinh(\tilde{\beta}_k) \cdot b_{k(n-1)}}{\delta_k}, \quad B_{kn} = -\frac{\alpha_k [\alpha_k^2 - (2-\nu)\lambda_k^2] \sinh(\tilde{\alpha}_k) \cdot b_{k(n-1)}}{\delta_k};$$

$$b_{ko} = \frac{\nu}{\lambda_k} \left(1 - \frac{2}{\lambda_k^2} \right);$$

$$\delta_k = (\alpha_k^2 - \nu\lambda_k^2) \beta_k [\beta_k^2 - (2-\nu)\lambda_k^2] \cosh(\tilde{\alpha}_k) \sinh(\tilde{\beta}_k) - (\beta_k^2 - \nu\lambda_k^2) \alpha_k [\alpha_k^2 - (2-\nu)\lambda_k^2] \sinh(\tilde{\alpha}_k) \cosh(\tilde{\beta}_k);$$

$$\alpha_k = \sqrt{0,5(2\lambda_k^2 - T + \sqrt{T^2 - 4\lambda_k^2 T})}; \quad \beta_k = \sqrt{0,5(2\lambda_k^2 - T - \sqrt{T^2 - 4\lambda_k^2 T})}, \quad \tilde{\alpha}_k = \alpha_k \gamma / 2, \quad \tilde{\beta}_k = \beta_k \gamma / 2;$$

$$m_{1n} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} \left[(\nu\alpha_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\sinh(\tilde{\alpha}_k)}{\tilde{\alpha}_k} A_{kn} + (\nu\beta_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\sinh(\tilde{\beta}_k)}{\tilde{\beta}_k} B_{kn} \right];$$

$$\vartheta_{1n} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k \left(\frac{\sinh(\tilde{\alpha}_k)}{\tilde{\alpha}_k} A_{kn} + \frac{\sinh(\tilde{\beta}_k)}{\tilde{\beta}_k} B_{kn} \right);$$

$$w_{2n}(x, y) = \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s \left[\frac{C_{sn} \sinh(\xi_s(y-1)) + D_{sn} \sinh(\eta_s(y-1))}{+E_{sn} \cosh(\xi_s(y-1)) + F_{sn} \cosh(\eta_s(y-1))} \right] \cos \mu_s x, \quad \mu_s = 2\pi s / \gamma;$$

$$\xi_s = \sqrt{\mu_s^2 + \mu_s \sqrt{T}}, \quad \eta_s = \sqrt{\mu_s^2 - \mu_s \sqrt{T}};$$

$$\begin{cases} C_{sn} \sinh(\xi_s) + D_{sn} \sinh(\eta_s) - E_{sn} \cosh(\xi_s) - F_{sn} \cosh(\eta_s) = 0; \\ C_{sn} \xi_s \cosh(\xi_s) + D_{sn} \eta_s \cosh(\eta_s) - E_{sn} \xi_s \sinh(\xi_s) - F_{sn} \eta_s \sinh(\eta_s) = -\vartheta_{sn}; \\ E_{sn} (\xi_s^2 - \nu\mu_s^2) \cosh(\xi_s) + F_{sn} (\eta_s^2 - \nu\mu_s^2) \cosh(\eta_s) = m_{sn}; \\ C_{sn} \xi_s [\xi_s^2 - (2-\nu)\mu_s^2] + D_{sn} \eta_s [\eta_s^2 - (2-\nu)\mu_s^2] = 0; \end{cases}$$

$$\vartheta_{sn} = \frac{4}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k \left(\frac{\alpha_k \sinh(\tilde{\alpha}_k)}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} A_{kn} + \frac{\beta_k \sinh(\tilde{\beta}_k)}{\beta_k^2 + \mu_s^2} B_{kn} \right);$$

$$m_{sn} = \frac{4}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} \left[(\nu\alpha_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\alpha_k \sinh(\tilde{\alpha}_k)}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} A_{kn} + (\nu\beta_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\beta_k \sinh(\tilde{\beta}_k)}{\beta_k^2 + \mu_s^2} B_{kn} \right], \quad \tilde{k} = (k+1)/2;$$

$$b_{kn} = \tilde{b}_{kn} + b_{kn}^*, \quad b_{kn}^* = -\frac{2\nu m_{1n}}{\lambda_k};$$

$$\tilde{b}_{kn} = 2 \sum_{s=1}^{\infty} \left[\frac{-C_{sn} (\mu_s^2 - \nu\xi_s^2) (-1)^{\tilde{k}} \xi_s + \lambda_k \sinh(\xi_s)}{\lambda_k^2 + \xi_s^2} - D_{sn} (\mu_s^2 - \nu\eta_s^2) \frac{(-1)^{\tilde{k}} \eta_s + \lambda_k \sinh(\eta_s)}{\lambda_k^2 + \eta_s^2}; \right. \\ \left. + E_{sn} (\mu_s^2 - \nu\xi_s^2) \frac{\lambda_k \cosh(\xi_s)}{\lambda_k^2 + \xi_s^2} + F_{sn} (\mu_s^2 - \nu\eta_s^2) \frac{\lambda_k \cosh(\eta_s)}{\lambda_k^2 + \eta_s^2} \right].$$

Далее вычисляются коэффициенты A_{k1} , B_{k1} и процесс повторяется. Параметры вычислительного процесса: $\gamma = a/b$; T .

Результаты (Results)

В системе компьютерной математики *Maple* была составлена программа для реализации алгоритма итерационного процесса определения прогибов прямоугольной консольной пластины с помощью приведенных выше формул. Невязки выполнения граничных условий выводились на печать на каждой итерации, что позволяло контролировать процесс и оценить быстроту его сходимости. Программой предусматривалось построение 3D графика изогнутой поверхности пластины. В рядах удерживалось 29 членов. Число циклов — 10. Во всех расчетах коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Для проверки правильности теории и алгоритма программы вычислений начальное значение относительной сжимающей нагрузки было принято достаточно малым, т. е. равным единице.

На рис. 2, а представлена форма квадратной консольной пластины под действием равномерной поперечной нагрузки и равномерной сжимающей относительной нагрузки $T = 1$.

Величины прогибов в контрольных точках: $w(0,1) = -0,13137$, $w(\pm\gamma/2, 1) = -0,12951$. Для сравнения приведем аналогичные значения прогибов без сжимающей нагрузки $w(0,1) = -0,12907$, $w(\pm\gamma/2, 1) = -0,12724$, полученные в работе [12]. Эти значения близки. С ростом сжимающей нагрузки в первой зоне устойчивого равновесия $0 < T < 43,75$ росли прогибы (см. 2, б) с сохранением формы, а затем, после $T = 40$, стал наблюдаться перегиб поверхности (см. рис. 2, в при $T = 43,745$).

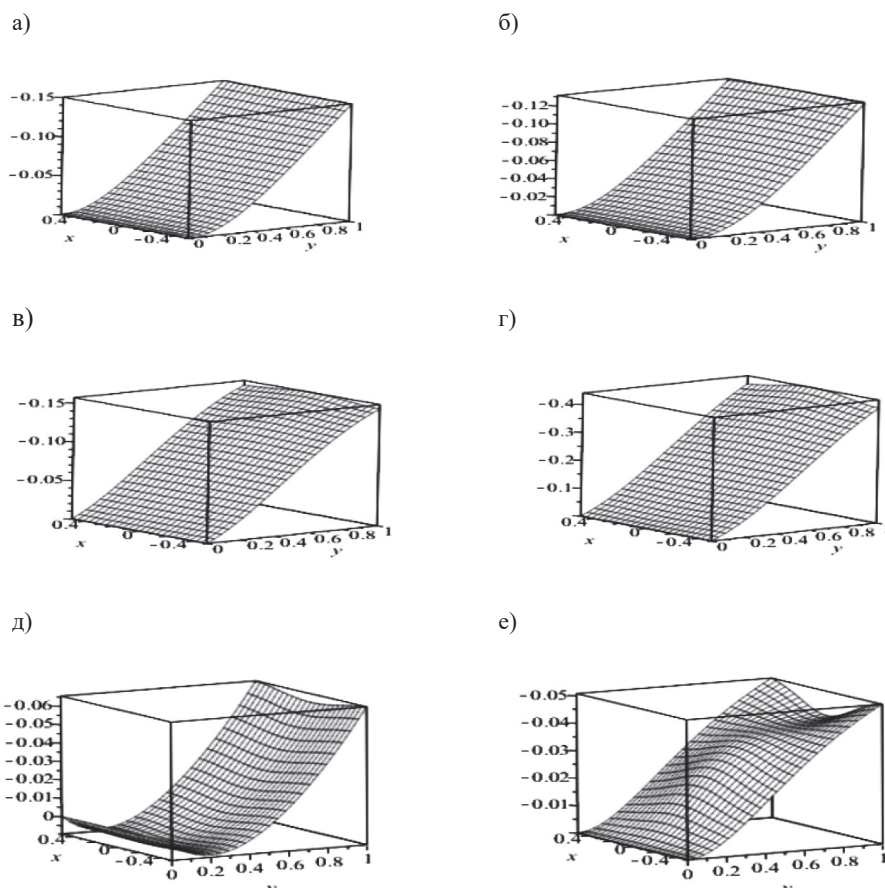


Рис. 2. Форма поверхности квадратной пластины:
а — при $T = 1$; б — при $T = 40$; в — $m = 43,745$;
г — при $T = 44,4$; д — при $T = 45,4$; е — при $T = 141,4$

В диапазоне $43,75 < T < 44,4$ вычислительный процесс был расходящимся: неограниченно росли прогибы, невязки и коэффициенты. Этот интервал является зоной неустойчивого состояния пластины. При значении $T = 44,05$ прогибы росли максимально быстро. Это значение можно принять в качестве первой критической нагрузки $T_{кр1} = 44,05$, при которой наиболее вероятно быстрое разрушение пластины, если она является недостаточно упругой. Разрушение может произойти и при любом значении нагрузки из опасного диапазона в случае ее длительного воздействия.

Вторая зона устойчивого состояния $44,4 < T < 45,4$. На рис. 2, з, д показаны формы пластины при $T = 44,4$ и $45,4$. За ней последовала вторая зона неустойчивого состояния $45,4 < T < 49$. Вторая критическая нагрузка $T_{кр2} = 45,9$.

Третья зона устойчивого состояния $49 < T < 98$. В этой зоне формы поверхностей пластины были аналогичны как и в первой зоне устойчивого состояния $0 < T < 43,75$. Следующая зона неустойчивости $98 < T < 102,4$. Найдено третье критическое значение $T_{кр3} = 100,6$.

Четвертая зона устойчивого состояния $102,4 < T < 120$. Неустойчивое состояние наблюдалось при $120 < T < 136,5$. Четвертое критическое значение $T_{кр4} = 125,5$.

Пятая зона устойчивости $136,5 < T < 200$. На рис. 2, *e* показана устойчивая форма равновесия пластины при $T = 141,4$. Аналогично можно продолжать этот процесс и далее.

Обсуждение (Discussion)

В работе [2] определялась первая (наименьшая) критическая нагрузка для прямоугольной консольной пластины, когда сжимающая нагрузка приложена к свободной стороне, параллельной заделке. Рассматривались три случая: распределенная нагрузка; сосредоточенная сила, приложенная в середине стороны; две одинаковые силы, приложенные в угловых точках. Для первого случая энергетическим методом из условия равенства нулю определителя второго порядка для сжимающего усилия p было получено значение $p_{кр} = 2,4571D/a^2$. В работе [3] рассматривались различные случаи сжимающей нагрузки, приложенной к боковым свободным сторонам. Получено первое критическое значение для квадратной пластины при равномерной нагрузке $p_{кр} = 141,41587D/a^2$. Однако это значение правильнее считать не критическим, а равновесным, так как минимум потенциальной энергии соответствует равновесному состоянию, а не критическому, которое наступает раньше и характеризуется максимумом энергии и неограниченным ростом прогибов. В данном случае соответствующее критическое значение (а по счету у нас оно четвертое) $T_{кр4} = 125,5$. Равновесная нагрузка, полученная в работе [3], находится в последующем интервале устойчивого состояния $136,5 < T < 200$ (рис. 7 соответствует этому устойчивому равновесному состоянию).

Отметим, что значение первой критической нагрузки $T_{кр1} = 44,05$ для квадратной консольной пластины находится в соответствии со значением первой критической нагрузки 37,8 для квадратной пластины [6], защемленной по всем сторонам.

Выводы (Summary)

1. В настоящей работе впервые получено численно-аналитическое решение задачи сложного изгиба тонкой прямоугольной консольной пластины как элемента оперения глубоководных аппаратов. Это решение позволяет весьма точно определить напряженно-деформированное состояние подобных элементов и решить проблему устойчивости в условиях сжимающего давления в плоскости пластины для различных отношений ее сторон.

2. При использовании новых материалов в конструкциях глубоководных аппаратов, обладающих высокой упругостью, найденный спектр критических нагрузок может быть использован в проектных организациях при расчетах на устойчивость. В дальнейшем предполагается исследовать более сложную аналогичную задачу с учетом сжимающей нагрузки на свободном крае, параллельном заделке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярцев Б. А. Композитные конструкции наружного корпуса и элементов оперения подводной лодки / Б. А. Ярцев, В. М. Шапошников // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2017. — № 1 (379). — С. 36–44.
2. Xiang-sheng C. The bending stability and vibration of cantilever rectangular plates / C. Xiang-sheng // Applied Mathematics and Mechanics. — 1987. — Vol. 8. — Is. 7. — Pp. 673–683. DOI: 10.1007/BF02458265.
3. Xiang-sheng C. On buckling of cantilever rectangular plates under symmetrical edge loading / C. Xiang-sheng // Applied Mathematics and Mechanics. — 1990. — Vol. 11. — Is. 4. — Pp. 377–383. DOI: 10.1007/BF02015121.
4. Исаулова Т. Н. Устойчивость консольно защемленной косоугольной неоднородной пластины в сверхзвуковом потоке газа / Т. Н. Исаулова, И. М. Лавит // Прикладная механика и техническая физика. — 2011. — Т. 52. — № 4 (308). — С. 191–204.
5. Сухотерин М. В. Устойчивость сжатых панелей обшивки судна / М. В. Сухотерин, Т. П. Кныш, Л. В. Анненков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2. — С. 51–58.

6. Сухотерин М. В. Определение спектра критических нагрузок и форм равновесия сжатых панелей обшивки корпуса судна / М. В. Сухотерин, Е. В. Потехина, Л. В. Анненков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 44–51.

7. Анненков Л. В. Исследование устойчивости защемленной прямоугольной пластины, сжатой в одном направлении / Л. В. Анненков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 48–53. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-48-53.

8. Sukhoterina M. V. Influence of transverse loading on the stability clamped rectangular plate / M. V. Sukhoterina, S. O. Baryshnikov, T. P. Knysh, N. F. Pizhurina // MATEC Web of Conferences. — EDP Sciences, 2018. — Vol. 239. — Pp. 01022. DOI: 10.1051/mateconf/201823901022.

9. Osadebe N. N. Stability analysis of SSSS thin rectangular plate using multi – degrees of freedom Taylor Maclaurin's series in Galerkin's variational method / N. N. Osadebe, V. C. Nwokike, O. A. Oguaghamba // Nigerian Journal of Technology. — 2016. — Vol. 35. — Is. 3. — Pp. 503–509. DOI: 10.4314/njt.v35i3.5.

10. Eslami M. R. Buckling and postbuckling of beams, plates, and shells / M. R. Eslami, J. Eslami, Jacobs. — Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. — 588 p. DOI: 10.1007/978-3-319-62368-9_4.

11. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1963. — 635 с.

12. Сухотерин М. В. Расчет прямоугольных пластин Рейсснера / М. В. Сухотерин, С. О. Барышников. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. — 151 с.

REFERENCES

1. Yartsev, Boris Aleksandrovich, and Valery Mikhailovich Shaposhnikov. "Composite light hull structures and tail unit elements of submarines." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1(379) (2017): 36–44.

2. Xiang-sheng, Cheng. "The bending stability and vibrations of cantilever rectangular plates." *Applied Mathematics and Mechanics* 8.7 (1987): 673–683. DOI: 10.1007/BF02458265.

3. Xiang-sheng, Cheng. "On buckling of cantilever rectangular plates under symmetrical edge loading." *Applied Mathematics and Mechanics* 11.4 (1990): 377–383. DOI: 10.1007/BF02015121.

4. Isaulova, T. N., and I. M. Lavit. "Stability of a cantilevered skew inhomogeneous plate in supersonic gas flow." *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics* 52.4 (2011): 664–675. DOI: 10.1134/S0021894411040201.

5. Sukhoterina, M. V., T. P. Knysh, and L. V. Annenkov. "Stability of ship's plating compressed panels." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2 (2013): 51–58.

6. Sukhoterina, M. V., E. V. Potekhina, and L. V. Annenkov. "Determination of the spectrum of critical loads and forms balance compressed cladding panels hull." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 44–51.

7. Annenkov, L. V. "Explore of stability of clamped rectangular plate, compressed in one direction." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 48–53. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-48-53.

8. Sukhoterina, Mikhail, Sergey Baryshnikov, Tatiana Knysh and Natalia Pizhurina. "Influence of transverse loading on the stability of a clamped rectangular plate." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 239. EDP Sciences, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201823901022.

9. Osadebe, N. N., V. C. Nwokike, and O. A. Oguaghamba. "Stability analysis of SSSS thin rectangular plate using multi – degrees of freedom Taylor Maclaurin's series in Galerkin's variational method." *Nigerian Journal of Technology* 35.3 (2016): 503–508. DOI: 10.4314/njt.v35i3.5.

10. Eslami, M. Reza, Jacobs Eslami, and Jacobs. *Buckling and postbuckling of beams, plates, and shells*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-62368-9_4.

11. Timoshenko, S., and S. Woinowsky-Krieger. *Theory of Plates and Shells*. New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, 1959.

12. Sukhoterina, M. V., and S. O. Baryshnikov. *Raschet pryamougol'nykh plastin Reissnera*. SPb.: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —

доктор технических наук, профессор, ректор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rector@gumrf.ru

Сухотерин Михаил Васильевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_math@gumrf.ru

Кныш Татьяна Петровна —

кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_pm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergej O. —

Dr. of Technical Sciences, professor, rector
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: rector@gumrf.ru

Sukhoterin, Mikhail V. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_math@gumrf.ru

Knysh, Tat'yana P. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_pm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 января 2020 г.

Received: January 14, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368

ASSESSMENT OF SYNCHRONOUS VIBRATIONS RISKS AS EXEMPLIFIED IN THE SHAFTING TORSIONAL VIBRATIONS ANALYSIS FOR R118 PROJECT PASSENGER SHIP

V. V. Martianov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

High requirements for the failure-free operation of the ship propulsion complex dictate the need to assess the risk of resonance torsional vibrations of the shaft line. The methodology for calculating resonant torsional vibrations of a ship shaft line is considered on the example of a passenger ship of P118 project. The technical parameters of the ship and its power plant are given. The calculated discrete mathematical model of the shaft line is presented and its parameters are determined, the main stages of the torsional vibrations calculation are described, and the calculations results for each stage are presented. As a result of computer simulation using a discrete mathematical model, the natural frequency of torsional vibrations of the shaft line and the corresponding potentially dangerous frequencies of the shaft line rotation are determined. For the engine to operate at dangerous frequencies the exciting moments from the engine are calculated and the forced vibrations amplitudes are determined. The calculation of forced vibrations is based on determining the driving torques caused by the engine operation. The engine characteristics necessary to obtain an indicator diagram of its duty cycle are described in the paper. The dependence of the tangential force versus crankshaft rotation angle is obtained as a result of a force analysis of the engine mechanism. For the harmonic analysis of the obtained dependence, a specially written for this purpose program is used. Performing these calculations for all operating modes of the engine makes it possible to establish the dependence of the tangential force harmonic components on the crankshaft rotational speed and construct the corresponding graphs. On the basis of the obtained dependences, the driving moments of the engine are determined. When calculating the driving torques, the well-known empirical formulas are used in the work. Based on the forced vibrations calculation results, the most dangerous section of the shaft line is determined. An analysis of the presented results makes it possible to formulate recommendations both in terms of possible structural changes (during the design or significant modernization of ships), and in terms of restrictions on operational conditions.

Keywords: ship, engine, shafting, propeller shaft, propeller screw, exploitation, torsional vibrations, assessment, resonance.

For citation:

Martianov, Vladimir V. "Assessment of synchronous vibrations risks as exemplified in the shafting torsional vibrations analysis for R118 project passenger ship." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368.

УДК 621.431:629

ОЦЕНКА УГРОЗЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА ПАССАЖИРСКОГО ТЕПЛОХОДА ПР. P118

В. В. Мартьянов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Высокие требования к безотказной работе судового пропульсивного комплекса диктуют необходимость оценки риска возникновения резонансных крутильных колебаний валопровода. Методика расчета резонансных крутильных колебаний судового валопровода рассмотрена на примере пассажирского теплохода проекта P118. Приведены технические параметры теплохода и его энергетической установки. Представлена расчетная дискретная математическая модель валопровода и определены ее параметры, описаны основные этапы расчета крутильных колебаний и приведены результаты вычислений по каждому этапу.

В результате компьютерного моделирования с использованием дискретной математической модели определена собственная частота крутильных колебаний валопровода и соответствующие ей потенциально опасные частоты вращения валопровода. Для работы двигателя на опасных частотах рассчитаны вынуждающие моменты от двигателя и определены амплитуды вынужденных колебаний. Приведены характеристики двигателя, необходимые для получения индикаторной диаграммы его рабочего цикла. Зависимость тангенциальной силы от угла поворота коленчатого вала получена в результате силового анализа механизма двигателя. Для гармонического анализа полученной зависимости использована специально написанная для этой цели программа. Выполнение указанных вычислений для всех эксплуатационных режимов работы двигателя позволило установить зависимость гармонических составляющих тангенциальной силы от частоты вращения коленчатого вала и построить соответствующие графики. На основе полученных зависимостей определены вынуждающие моменты от двигателя. При расчете вынуждающих моментов в работе использованы известные в инженерной практике эмпирические формулы. По результатам расчета вынужденных колебаний определен наиболее опасный участок валопровода. Анализ представленных результатов дает возможность сформулировать рекомендации как в части возможных конструктивных изменений (при проектировании или существенной модернизации судов), так и в части ограничений эксплуатационных режимов.

Ключевые слова: судно, двигатель, валопровод, гребной вал, гребной винт, эксплуатация, крутильные колебания, оценка, резонанс.

Для цитирования:

Мартьянов В. В. Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского теплохода пр. Р118 / В. В. Мартьянов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С.359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368.

Введение (Introduction)

Валопровод судовой энергетической установки является упругой системой, работающей в условиях периодически изменяющихся нагрузок — сил и вращающих моментов. В результате действия этих нагрузок в валопроводе возникают колебания нескольких видов: крутильные, осевые и изгибные. Поскольку валопровод, как любая упругая система, обладает собственными частотами, наибольшую опасность для его работы представляют резонансные колебания, возникающие при совпадении частот нагрузок с одной из собственных частот. Амплитуды колебаний и деформации различных участков валопровода резко возрастают даже при частотах, близких к резонансным, и могут превысить предельно допустимые. Такие колебания могут привести не только к поломкам самого валопровода, но и вызвать сильную вибрацию корпусных конструкций, особенно вблизи опор валопровода [1]–[4].

Крутильные колебания с амплитудами, превышающими допустимые значения, нередко вызывают повреждения валопровода [5]. Непосредственной причиной поломок является усталость материала в местах возникновения наибольших напряжений. Чаще всего случаются повреждения упорных подшипников, коленчатых и гребных валов [6]. Это связано с конструктивными особенностями данных участков валопровода [7], [8].

Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний требует выполнения расчета, который включает ряд этапов [9], рассмотренных на примере расчета крутильных колебаний для пассажирского теплохода пр. Р118.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общая характеристика элементов валопровода теплохода: пассажирский теплоход пр. Р118 (тип «Фонтанка») предназначен для прогулочных и экскурсионных перевозок по городским рекам и каналам [10], представляет собой одновинтовое двухпалубное судно с кормовым расположением машинного отделения; водоизмещение — 31,060 т. Габаритная длина судна — 20,6 м, ширина — 5,43 м, высота борта — 1,3 м, осадка — 0,44 м, скорость — 16 км/ч. Главным двигателем является дизель ЯМЗ-238ГМ2 производства компании ПАО «Ярославский моторный завод» мощностью 177 кВт (240 л. с.).

Технические характеристики дизеля ЯМЗ-238ГМ2 [11]:

– мощность — 177 кВт (240 л. с.);

– частота вращения коленчатого вала — 2100 мин^{–1};

- число цилиндров — 8;
- тип двигателя — четырехтактный с воспламенением от сжатия;
- расположение цилиндров — V-образное;
- расположение кривошипов под углом 90°;
- диаметр цилиндра — 130 мм;
- ход поршня — 140 мм.

Главная передача прямая, дизель соединен с гребным винтом посредством гребного и промежуточного валов. Промежуточный вал (муфта P140-T «Python-Drive»). Гребной винт фиксированного шага, левого вращения имеет следующие параметры: диаметр — 0,45 м, шаговое отношение — 0,436, дисковое отношение — 1,1, число лопастей — 3, масса — 23 кг, момент инерции — 0,179 кг·м².

На первом этапе необходимо составить расчетную модель валопровода и вычислить ее параметры. При исследовании динамических процессов в механических системах, обладающих упругими свойствами, обычно используются дискретные модели, позволяющие в расчетных целях заменить реальный механизм системой чередующихся масс и соединений. Считается, что дискретные массы недеформируемы и обладают лишь инерционными свойствами, а соединения лишены массы и обладают лишь упругими свойствами.

В результате детального анализа конструкций всех элементов валопровода с использованием заводской документации и выполнения значительного объема вычислений была получена дискретная модель, приведенная на рис. 1.

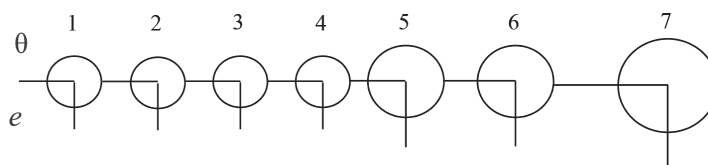


Рис. 1. Дискретная модель судового валопровода теплохода пр. Р118

Условные обозначения:

массы 1–4 — коленчатый вал двигателя; масса 5 — маховик;
масса 6 — промежуточный вал; масса 7 — гребной винт

Необходимые для расчетов динамики валопровода параметры дискретной модели приведены в табл. 1. Для перехода к безразмерным параметрам использованы следующие формулы:

$$\vartheta_i = \frac{\theta_i}{\theta_0}; \quad E_{i,i+1} = \frac{e_{i,i+1}}{e_0},$$

где θ_i и e_i — постоянные дискретной модели.

Принимаем следующие значения θ_0 и e_0 : $\theta_0 = 0,0545$ кг·м²; $e_0 = 3,281 \cdot 10^{-8}$.

Отметим, что величины θ_0 и e_0 вычислены с использованием приближенных формул Терских и при расчете момента инерции гребного винта учитывается присоединенная масса воды.

Таблица 1

Параметры дискретной модели судового валопровода теплохода пр. Р118

Номер массы	$e, \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	$\theta, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	E	ϑ
1	—	0,0545	—	1
2	$3,281 \cdot 10^{-8}$	0,0545	1	1
3	$3,281 \cdot 10^{-8}$	0,0545	1	1
4	$3,281 \cdot 10^{-8}$	0,0545	1	1
5	$1,260 \cdot 10^{-8}$	1,362	0,384	24,99
6	$3,512 \cdot 10^{-7}$	0,749	10,704	13,74
7	$1,505 \cdot 10^{-5}$	0,600	458,702	11,00
	—		—	

Полученная дискретная модель валопровода использовалась при математическом моделировании его работы в различных режимах.

Вторым этапом расчета крутильных колебаний является определение собственных частот валопровода и потенциально опасных частот вращения валопровода. Для определения собственных частот использовалась разработанная автором программа численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику дискретной модели валопровода. В результате машинного расчета крутильных колебаний в рабочем диапазоне 0–300 Гц определена лишь одна (одноузловая) форма колебаний с частотой $n_{e1} = 58,890$ Гц.

Для нахождения опасных частот вращения валопровода была построена лучевая диаграмма, анализ которой показал, что при собственной частоте n_{e1} у теплохода пр. Р118 в рабочем диапазоне частот вращения валопровода возможны резонансы на четырех частотах:

- резонанс третьего порядка одноузловой формы (лопастная частота) соответствует частоте вращения 1373 мин^{-1} ;
- резонанс четвертого порядка одноузловой формы (моторная частота) соответствует частоте вращения 1032 мин^{-1} ;
- резонанс шестого порядка одноузловой формы (лопастная частота) соответствует частоте вращения 685 мин^{-1} ;
- резонанс восьмого порядка одноузловой формы (моторная частота) соответствует частоте вращения 513 мин^{-1} .

На третьем этапе расчета необходимо определить вынуждающие моменты от двигателя.

По результатам теплового расчета на номинальном режиме были получены следующие значения: максимальное давление цикла 6,46 МПа; давление конца сжатия 4,55 МПа; давление в начале выпуска 0,27 МПа; степень сжатия 16,5; степень повышения давления 1,42; степень последующего расширения 12,20; степень предварительного расширения 1,35.

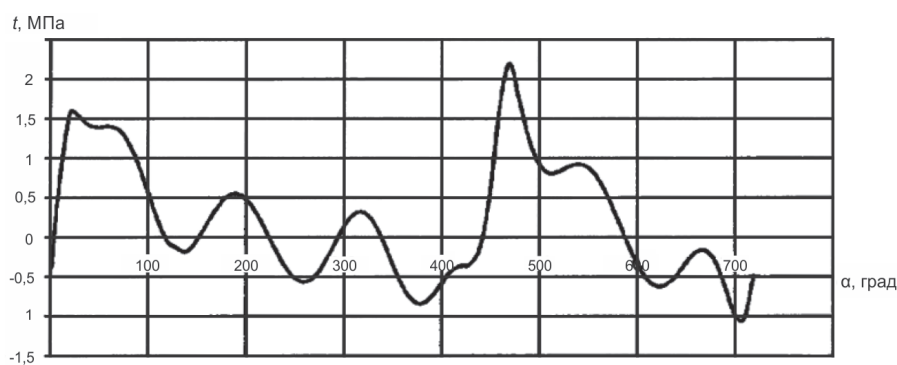


Рис. 2. Тангенциальная сила
в функции угла поворота коленчатого вала

Полученные значения дали возможность построить индикаторную диаграмму и выполнить силовой анализ механизма двигателя. Таким образом, была определена зависимость тангенциальной силы от угла поворота коленчатого вала (рис. 2). Последующий гармонический анализ этой зависимости дал результаты, представленные в табл. 2. Подобные расчеты были выполнены для всех эксплуатационных режимов работы двигателя.

Таблица 2

Гармонические составляющие тангенциальной силы

ν	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
t_ν	0,18	0,60	0,56	0,01	0,44	0,20	0,13	0,25	0,10	0,16	0,16	0,01

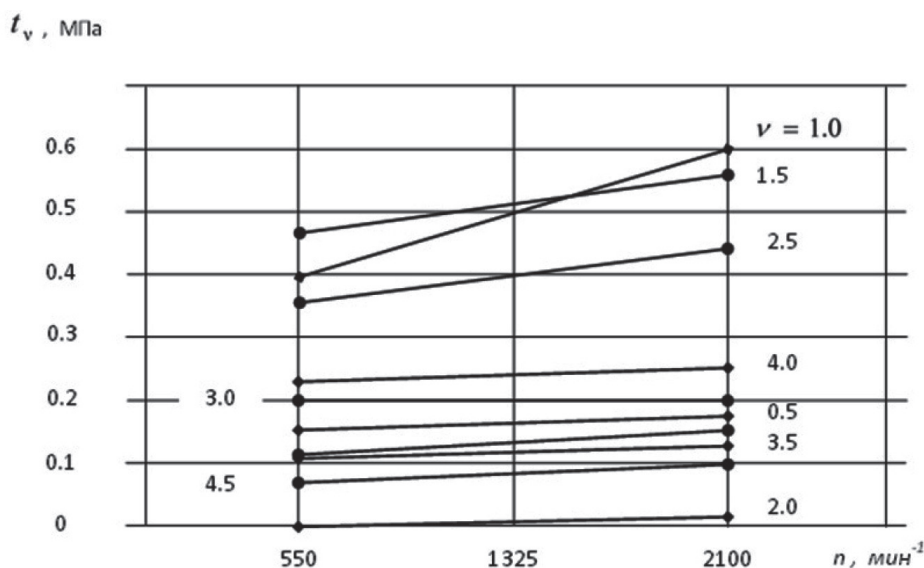


Рис. 3. Гармоники тангенциальной силы в зависимости от оборотов коленчатого вала

По результатам расчетов были построены графики зависимости гармонических составляющих тангенциальной силы от частоты вращения вала двигателя, работающего по винтовой характеристике (рис. 3). Полученные зависимости являются основой для определения вынуждающих моментов от двигателя.

Расчет резонансных колебаний третьего порядка. Резонансные колебания третьего порядка обусловлены работой гребного винта с частотой вращения 1373 мин^{-1} . Амплитуда вынуждающего момента для этого случая может быть определена по формуле

$$M_{v=3} = 0,042 \cdot M_m = 0,042 \cdot 368,291 = 15,468 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (1)$$

где M_m — среднее значение крутящего момента гребного винта.

Для вычисления крутящего момента могут быть использованы эмпирические зависимости:

$$M_m = 9550 \cdot \frac{N}{n} = 9550 \cdot \frac{52,949}{1373} = 368,291 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2)$$

$$N = N_e \cdot \left(\frac{n}{n_e} \right)^m = 177 \cdot \left(\frac{1373}{2100} \right)^{2,84} = 52,949 \text{ кВт}. \quad (3)$$

В формуле (3) показатель степени принят равным 2,84 на основании Протокола № 41 теплотехнических испытаний двигателя от 23 мая 2013 г.

Для расчета коэффициентов демпфирования b_i также используются эмпирические формулы:

– для кривошипно-шатунного механизма дизеля

$$b_1 = 0,04 \cdot \omega_e \cdot \theta_{\text{КШМ}} = 0,04 \cdot 370,017 \cdot 0,055 = 0,814 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, \quad (4)$$

где ω_e — круговая частота свободных колебаний одноузловой формы,

$$\omega_e = 2\pi \cdot n_e = 2\pi \cdot 58,890 = 370,017 \text{ с}^{-1}; \quad (5)$$

– для гребного винта

$$b_2 = 30 \cdot \frac{M_m}{n} = 30 \cdot \frac{368,291}{1373} = 8,047 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}. \quad (6)$$

Найденные значения параметров позволяют определить амплитуду крутильных колебаний первой массы дискретной модели валопровода:

$$A_1 = \frac{M_{v=3} \cdot \alpha_7}{\omega_v \cdot \left(b_1 \cdot \sum_1^4 \alpha_i^2 + b_2 \cdot \alpha_7^2 \right)} =$$

$$= \frac{15,468 \cdot 3,750}{370,017 \cdot (0,814 \cdot 3,996 + 8,047 \cdot 3,750^2)} = 1,347 \cdot 10^{-3} \text{ рад.} \quad (7)$$

Полагая равными формы свободных и резонансных колебаний, можно найти амплитуды и для остальных шести масс модели. Результаты вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Амплитуды колебаний масс при резонансе 3-го порядка
на частоте вращения 1373 мин⁻¹**

Номер массы	1	2	3	4	5	6	7
α_i	1	1	0,999	0,999	0,998	0,922	-3,750
$A_i \cdot 10^3$	1,347	1,347	1,346	1,346	1,344	1,241	-5,051

Построенная по этим данным диаграмма амплитуд колебаний дискретных масс приведена на рис. 4. Диаграмма наглядно показывает место наибольшей деформации валопровода при его закручивании, это место соединения вала с гребным винтом.

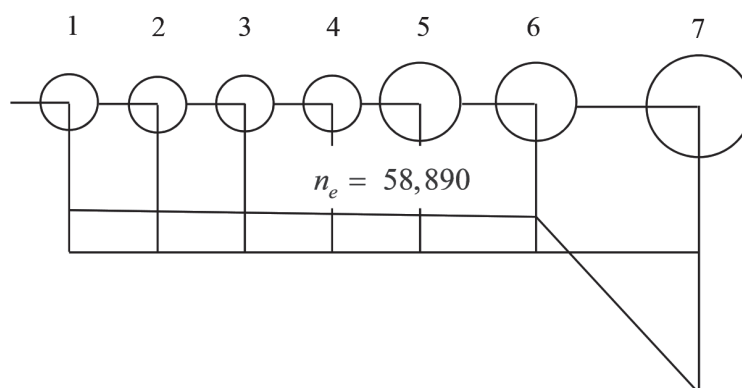


Рис. 4. Диаграмма амплитуд колебаний масс дискретной модели при резонансе 3-го порядка на частоте вращения 1373 мин⁻¹

Расчет резонансных колебаний четвертого порядка. Резонансные колебания этого порядка обусловлены работой главного двигателя при частоте вращения 1032 мин⁻¹. Амплитуда вынуждающего момента для этого случая может быть определена по формуле

$$M_{v=4} = t_{v=4} \cdot R \cdot F, \quad (8)$$

где $t_{v=4}$ — амплитуда тангенциальной силы для резонанса 4-го порядка; $R = 0,07$ м — радиус кривошипа; $F = 0,0133$ м² — площадь поршня двигателя.

Согласно рис. 3, $t_{v=4} = 0,23$ МПа. Тогда

$$M_{v=4} = t_{v=4} \cdot R \cdot F = 0,23 \cdot 0,07 \cdot 0,0133 = 0,214 \text{ кН} \cdot \text{м.} \quad (9)$$

Коэффициенты демпфирования b_i рассчитываются по эмпирическим формулам:

— для кривошипно-шатунного механизма ДВС

$$b_1 = 0,04 \cdot \omega_e \cdot \theta_{\text{КШМ}} = 0,04 \cdot 370,017 \cdot 0,055 = 0,814 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, \quad (10)$$

где ω_e — круговая частота свободных колебаний одноузловой формы, $\omega_e = 2\pi \cdot n_e = 2\pi \cdot 58,890 = 370,017$ с⁻¹.

– для гребного винта

$$b_2 = 30 \cdot \frac{M_m}{n} = 30 \cdot \frac{217,799}{1032} = 6,331 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}. \quad (11)$$

где M_m — среднее значение крутящего момента, для вычисления которого, как и ранее, использованы эмпирические зависимости:

$$M_m = 9550 \cdot \frac{N}{n} = 9550 \cdot \frac{23,536}{1032} = 217,799 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (12)$$

$$N = N_e \cdot \left(\frac{n}{n_e} \right)^m = 177 \cdot \left(\frac{1032}{2100} \right)^{2,84} = 23,536 \text{ кВт}. \quad (13)$$

Найденные значения параметров позволяют определить амплитуду крутильных колебаний первой массы дискретной модели валопровода:

$$A_1 = \frac{M_{v=4} \cdot \sum_1^4 \bar{\alpha}_i}{\omega_v \cdot \left(b_1 \cdot \sum_1^4 \alpha_i^2 + b_2 \cdot \alpha_7^2 \right)} =$$

$$= \frac{0,214 \cdot 10^3 \cdot 3,998}{370,017 \cdot (0,814 \cdot 3,996 + 6,331 \cdot 3,750^2)} = 0,025 \text{ рад}. \quad (14)$$

Сумма безразмерных амплитуд $\sum_1^4 \bar{\alpha}_i$ для дискретных масс, представляющих коленчатый вал двигателя, в данном случае равна 3,998. Исходя из равенства форм свободных и резонансных колебаний, находятся амплитуды для остальных масс модели. Результаты вычислений приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Амплитуды колебаний масс
при резонансе 4-го порядка на частоте вращения 1032 мин⁻¹**

Номер массы	1	2	3	4	5	6	7
α_i	1	1	0,999	0,999	0,998	0,922	–3,750
A_i	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,023	–0,094

Построенная по этим данным диаграмма амплитуд колебаний дискретных масс изображена на рис. 5. Как и в предыдущем случае, диаграмма показывает, что место наибольшей деформации валопровода при его закручивании — это место соединения вала с гребным винтом.

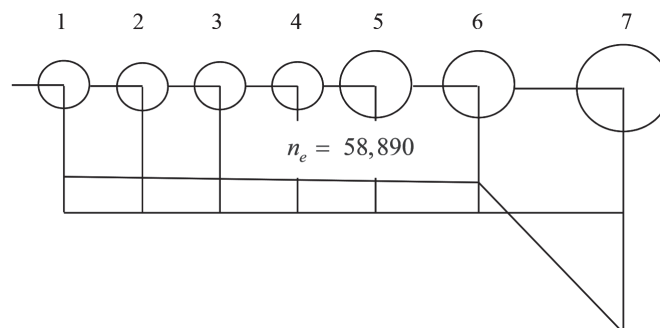


Рис. 5. Диаграмма амплитуд колебаний масс дискретной модели при резонансе 4-го порядка на частоте вращения 1032 мин⁻¹

Расчет резонансных колебаний шестого порядка. Резонансные колебания этого порядка обусловлены работой гребного винта с частотой вращения 685 мин⁻¹. Амплитуда вынуждающего момента для этого случая определена по формуле

$$M_{v=6} = 0,043 \cdot M_m = 0,043 \cdot 102,457 = 4,406 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (15)$$

где M_m — среднее значение крутящего момента гребного винта, для вычисления которого вновь используются эмпирические зависимости:

$$M_m = 9550 \cdot \frac{N}{n} = 9550 \cdot \frac{7,349}{685} = 102,457 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (16)$$

$$N = N_e \cdot \left(\frac{n}{n_e} \right)^m = 177 \cdot \left(\frac{685}{2100} \right)^{2,84} = 7,349 \text{ кВт}. \quad (17)$$

Коэффициенты демпфирования b_i также рассчитываются по формулам (10) и (11):

– для кривошипно-шатунного механизма ДВС

$$b_1 = 0,04 \cdot \omega_e \cdot \theta_{\text{КШМ}} = 0,04 \cdot 370,017 \cdot 0,055 = 0,814 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, \quad (18)$$

где ω_e — круговая частота свободных колебаний одноузловой формы,

$$\omega_e = 2\pi \cdot n_e = 2\pi \cdot 58,890 = 370,017 \text{ с}^{-1};$$

– для гребного винта

$$b_2 = 30 \cdot \frac{M_m}{n} = 30 \cdot \frac{102,457}{685} = 4,487 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}. \quad (19)$$

С учетом полученных значений амплитуда крутильных колебаний первой массы дискретной модели составляет

$$A_1 = \frac{M_{v=6} \cdot \alpha_7}{\omega_v \cdot \left(b_1 \cdot \sum_1^4 \alpha_i^2 + b_2 \cdot \alpha_7^2 \right)} =$$

$$= \frac{4,406 \cdot 3,750}{370,017 \cdot (0,814 \cdot 3,996 + 4,487 \cdot 3,750^2)} = 0,673 \cdot 10^{-3} \text{ рад}. \quad (20)$$

Как и ранее, амплитуды колебаний остальных масс дискретной модели находятся исходя из совпадения форм свободных и резонансных колебаний. Результаты вычислений представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Амплитуды колебаний масс
при резонансе 6-го порядка на частоте вращения 685 мин⁻¹**

Номер массы	1	2	3	4	5	6	7
α_i	1	1	0,999	0,999	0,998	0,922	–3,750
$A_i \cdot 10^3$	0,673	0,673	0,672	0,672	0,672	0,621	–2,525

Построенная по данным табл. 5 диаграмма амплитуд колебаний дискретных масс изображена на рис. 6. Диаграмма вновь показывает, что место наибольшей деформации валопровода при его закручивании это место соединения вала с гребным винтом.

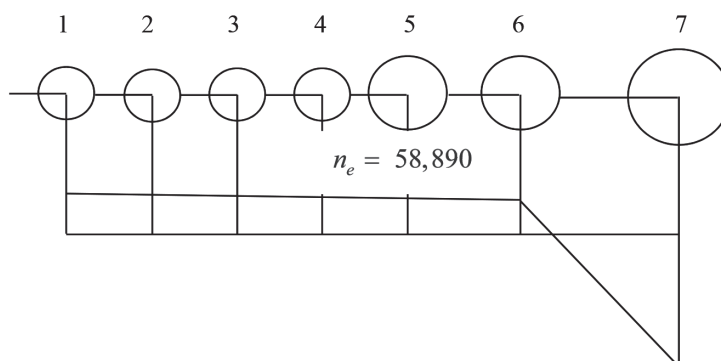


Рис. 6. Диаграмма амплитуд колебаний масс дискретной модели при резонансе 6-го порядка на частоте вращения 685 мин⁻¹

Результаты (Results)

Изложенная методика расчета резонансных крутильных колебаний судового валопровода судна проекта Р118 позволяет определить возможные амплитуды колебаний на разных его участках и сравнить полученные значения с предельно допустимыми. На этапе проектирования это позволяет в случае необходимости внести соответствующие конструктивные изменения, предусмотреть средства демпфирования либо установить запретную для эксплуатации зону в некотором диапазоне частот вращения валопровода. Очевидно, что запретный диапазон не должен перекрывать основные рабочие диапазоны.

В данном случае опасных резонансных колебаний валопровода пассажирского теплохода выявлено не было. Однако натурные измерения вибрации зафиксировали заметное увеличение амплитуды вибрации вблизи резонансных частот.

Обсуждение (Discussion)

На сегодняшний день исследование крутильных колебаний судовых установок является обязательной процедурой при проектировании или модернизации судов, а также в процессе их эксплуатации при осуществлении контроля технического состояния элементов пропульсивного комплекса судна [12], [13]. В разд. 8 Российского морского регистра судоходства изложены требования к выполнению подобных исследований [14]. Приведенная в работе методика расчетов полностью соответствует данным требованиям.

Как отмечалось ранее в работе, исследования крутильных колебаний должны выполняться не только при проектировании, но и при существенной модернизации судов (замене двигателя, гребного винта и т. п.), а также в иных случаях. Это делает актуальным совершенствование методов их расчета, особенно в части компьютеризации с целью сокращения времени и уменьшения трудоемкости данной процедуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартыанов В. В. Условия работы и возможные причины вибрации на прогулочных пассажирских судах под действием крутильных колебаний и поперечных колебаний / В. В. Мартыанов // Материалы 5-й межвузовской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России». — СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2014. — С. 131–135.
2. Мартыанов В. В. Теоретические основы определения энергии колебаний валопровода и передачи ее на корпусные конструкции / В. В. Мартыанов, А. И. Каляуш // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2018. — Т. 2. — С. 40–45.
3. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. — М., 2006. — 440 с.
4. Boonlong K. Numerical study on axial vibration of water-lubricated small thrust bearing considering grooved pad / K. Boonlong, P. Jeenkour // Vibroengineering procedia. — 2017. — Vol. 16. — Pp. 13–18. DOI: 10.21595/vp.2017.19346
5. Троицкий А. В. Крутильные колебания в судовых валопроводах энергетических установках с упругими нелинейными элементами / А. В. Троицкий, А. А. Чернышев, Г. И. Бухарина // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № S1. — С. 183–188. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-183-188.
6. Румб В. К. Упрощенный подход к определению гидродинамических параметров упорных подшипников судовых валопроводов / В. К. Румб, В. Т. Хоанг // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 1-4 (42). — С. 144–149.
7. Колыванов В. В. Прогнозирование работоспособности элементов судового валопровода с использованием акустической тензометрии: дис... канд. техн. наук / В. В. Колыванов. — СПб., 2010. — 133 с.
8. Чура М. Н. Прогнозирование начальной стадии усталостного разрушения судовых гребных валов: дис... канд. техн. наук / М. Н. Чура. — Новороссийск, 2011. — 132 с.
9. Мартыанов В. В. Расчет крутильных колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода «Эридан» пр. Р19-1 / В. В. Мартыанов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 146–153.

10. Пассажирский теплоход для рек и каналов Санкт-Петербурга проект P118. Программа и методика приемочных испытаний. — СПб.: ООО «ЦИЛ», 2013. — 28 с.
11. Шамаль Н. Л. Двигатели ЯМЗ-236М2, ЯМЗ-238М2: рук. по экспл. / Н. Л. Шамаль. — Ярославль, 2012. — 176 с.
12. Российский речной регистр. Правила классификации и постройки судов (ИКПС). — М., 2019. — С. 451–457.
13. Ефремов Л. В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий / Л. В. Ефремов. — СПб.: Наука, 2007. — 276 с.
14. Российский Морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. VII: Механические установки. — СПб., 2020. — С. 62–70.

REFERENCES

1. Mart'yanov, V. V. "Usloviya raboty i vozmozhnye prichiny vibratsii na progulochnykh passazhirskikh sudakh pod deistviem krut'il'nykh kolebaniy i poperechnykh kolebaniy." *Materialy 5-i mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF, 2014. 131–135.
2. Mart'yanov, V. V., and A. I. Kalyaush. "Teoreticheskie osnovy opredeleniya energii kolebaniy valoprovoda i peredachi ee na korpusnye konstruksii." *Sbornik nauchnykh statei natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova»*. Vol. 2. SPb.: Izd-vo GUMRF, 2018. 40–45.
3. Timoshenko, S. P. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. M.: Izd-vo KomKniga, 2006.
4. Boonlong, Kittipong, and Puttha Jeenkour. "Numerical study on axial vibration of water-lubricated small thrust bearing considering grooved pad." *Vibroengineering PROCEDIA* 16 (2017): 13–18. DOI: 10.21595/vp.2017.19346.
5. Troitskiy, A. V., A. A. Chernyshev, and G. I. Bukharina. "Elastic non-linear torsions in shaft lines of marine power plants." *Transactions of the Krylov State Research Centre SI* (2019): 183–188. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-183-188.
6. Rumb, Viktor K., and Van Tu Hoang. "A simplified approach to the determination of the hydrodynamic parameters of thrust bearings in ship propulsion systems." *Marine intelligent technologies* 1-4(42) (2018): 144–149.
7. Kolyvanov, V. V. *Prognozirovanie rabotosposobnosti elementov sudovogo valoprovoda s ispol'zovaniem akusticheskoi tenzometrii*. Phd diss. SPb.: 2010.
8. Chura, M. N. *Prognozirovanie nachal'noi stadii ustalostnogo razrusheniya sudovykh grebnykh valov*. Phd diss. Novorossiisk, 2011.
9. Mart'yanov, V. V. "A ship shafting torsional oscillation calculation of the pleasure passenger ship «eridanus» pr. R19-1." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 146–153.
10. *Passazhirskii teplokhod dlya rek i kanalov Sankt-Peterburga proekt R118. Programma i metodika priemochnykh ispytaniy*. SPb.: ООО «ТсИЛ», 2013.
11. Shamal', N. L. *Dvigateli YaMZ-236M2, YaMZ-238M2. Rukovodstvo po ekspluatatsii*. Yaroslavl', 2012.
12. *Rossiiskii Rechnoi Registr. Pravila klassifikatsii i postroiki sudov (IKPS)*. M., 2019. 451–457.
13. Efremov, L. V. *Teoriya i praktika issledovaniy krut'il'nykh kolebaniy silovykh ustanovok s primeneniem komp'yuternykh tekhnologii*. SPb.: Nauka, 2007.
14. *Rossiiskii Morskoj Registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Chast' VII. Mekhanicheskie ustanovki*. SPb., 2020. 62–70.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мартъянов Владимир Васильевич — кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, д. 5/7
e-mail: vladimir.dvs82@gmail.com, kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Martianov, Vladimir V. — PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vladimir.dvs82@gmail.com, kaf_dvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 января 2020 г.
Received: January 15, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-369-380

ANALYSIS OF THE DYNAMIC STRESS-STRAIN STATE OF SHIP MECHANISMS WITH ELASTIC ANISOTROPIC LINKS

T. T. Sultanov¹, Z. R. Burnaev², G. M. Tlepiyeva¹

¹ — Eurasian National University named after L.N. Gumilev,
Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan

² — National defense University named after the First President of the Republic
of Kazakhstan-Elbasy, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan

The problems of calculating dynamic processes are widely used for a broad variety of complex ship mechanisms with elastic-deformable links. The dynamics of elastic ship mechanisms is a complex set of mechanical and physical phenomena. No issue can be solved rationally when designing ship mechanisms without taking into account the requirements of strength and rigidity of individual links and ship mechanisms as a whole. During operation, the ship's mechanisms are affected by various static and dynamic forces. To withstand the action of these forces, the ship's mechanisms must have sufficient strength in general and in their individual parts. One of the criteria for the construction material strength is stress, and for the stiffness is displacement. But establishing that the stresses do not exceed the permissible value does not always allow us to conclude that the structure can safely exist. Therefore, the concepts of displacements, deformations and stresses are crucial in strength and stiffness calculations. This is especially important when designing ship mechanisms consisting of a variety of core elements. Since elastic inertial elements are widely represented in them, the calculation of dynamics is essential for them. Currently, the problems of nonlinear dynamics of thin-walled structures under the action of complex loads have become a necessary component of engineering analysis. The calculation of the dynamics of spatial ship mechanisms with nonlinear elastic links by the most promising numerical method allows us to accurately describe both the geometry and the nature of the loads applied to it and the elastic properties of the ship mechanisms material and to analyze their stress-strain state. As well as obtaining reliable data on the load-bearing capacity of anisotropic rod links, it makes it possible to make rational design decisions when designing specific ship mechanisms.

Keywords: dynamics, stress-strain state, ship mechanisms, elastic links, anisotropy, geometric nonlinearity.

For citation:

Sultanov, Timur T., Zufar R. Burnaev, and Gulnar M. Tlepiyeva. "Analysis of the dynamic stress-strain state of ship mechanisms with elastic anisotropic links." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.2 (2020): 369–380. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-369-380.

УДК 621.828

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ МЕХАНИЗМОВ С УПРУГИМИ АНИЗОТРОПНЫМИ ЗВЕНЬЯМИ

Т. Т. Султанов¹, З. Р. Бурнаев², Г. М. Тлепиева¹

¹ — Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Нур-Султан, Республика Казахстан

² — Национальный университет обороны имени Первого Президента
Республики Казахстан – Елбасы, Нур-Султан, Республика Казахстан

Отмечается, что задачи расчета динамических процессов получили широкое распространение для самых разнообразных и сложных судовых механизмов с упруго деформируемыми звеньями. Исследована динамика упругих судовых механизмов, представляющая собой сложный комплекс механических и физических явлений. При этом обращается внимание на то, что ни один вопрос не может быть рационально решен при проектировании судовых механизмов без учета требований прочности и жесткости отдельных звеньев и судовых механизмов в целом. Отмечается, что во время эксплуатации судовые механизмы испытывают действие различных сил статического и динамического характера. При этом для того, чтобы

выдержать действие этих сил, судовые механизмы должны обладать достаточной прочностью в целом и отдельных своих частях. Одним из критериев прочности материала конструкции являются напряжения, а жесткости — перемещения. Установление того факта, что напряжения не превосходят допустимой величины, не всегда позволяет сделать заключение о том, что конструкция может безопасно существовать. Поэтому в расчетах на прочность и жесткость ключевыми являются понятия перемещений, деформаций и напряжений. Подчеркивается особая важность этого при проектировании судовых механизмов, состоящих из множества стержневых элементов. Поскольку в стержневых элементах широко представлены упругие инерционные элементы, расчет динамики имеет для них существенное значение. В настоящее время проблемы нелинейной динамики тонкостенных структур при воздействии комплекса нагрузок стали необходимым компонентом инженерного анализа. Обращается внимание на то, что расчет динамики пространственных судовых механизмов с нелинейно-упругими звеньями является наиболее перспективным численным методом, поскольку он позволяет точно описать как геометрию, так и характер приложенных к ней нагрузок и упругие свойства материала судовых механизмов и выполнить анализ их напряженно-деформируемого состояния, а также получить достоверные данные о несущей способности анизотропных стержневых звеньев. Данный расчет дает возможность принимать рациональные конструктивные решения при проектировании конкретных судовых механизмов.

Ключевые слова: динамика, напряженно-деформированное состояние, судовые механизмы, упругие звенья, анизотропия, геометрическая нелинейность.

Для цитирования:

Султанов Т. Т. Анализ динамического напряженно-деформированного состояния судовых механизмов с упругими анизотропными звеньями / Т. Т. Султанов, З. Р. Бурнаев, Г. М. Тлепиева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 369–380. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-369-380.

Введение (Introduction)

К современным судовым механизмам предъявляются следующие требования: большая надежность работы в любых условиях эксплуатации (крен, дифферент, все виды качки, низкие температуры окружающего воздуха), высокая экономичность, ремонтпригодность, малые массогабаритные и виброшумовые характеристики, большая степень унификации элементов и узлов, удобство эксплуатации и обслуживания, а также возможность автоматизации и дистанционного управления. В настоящее время в инженерных расчетах конструкций судовых механизмов линейный анализ продолжает оставаться наиболее распространенным средством оценки их работоспособности. Модель идеально упругого тела, благодаря свойствам совершенной упругости, однородности, изотропности, физической и геометрической линейности, вносит значительные упрощения в расчет, а также при решении многих важных задач позволяет получить результаты, дающий возможность вполне достоверно оценить работоспособность судовых механизмов. При этом зачастую упускается из вида, что он является, в лучшем случае, лишь первым приближением, справедливым лишь для начального состояния. Однако некоторые из современных конструкционных материалов не обладают всеми указанными ранее свойствами. Поэтому для решения ряда критических задач необходимо владеть теориями, позволяющими в достаточной степени отобразить реальные свойства материала, в том числе и тогда, когда такие свойства существенно отличаются от свойств идеально упругого тела. Последнее обстоятельство определяется как нелинейностью характеристик конструкционных материалов, так и изменением метрических характеристик самой конструкции в процессе деформирования. Учет этих факторов является предметом нелинейного анализа [1].

Внесения необходимых уточнений в модель идеально упругого тела требуют в первую очередь тонкостенные пространственные судовые механизмы. При сложных условиях их нагружения и высоких уровнях напряжений свойство относительной жесткости оказывается нарушенным и приводит к значительному усложнению уравнений равновесия и геометрических соотношений — они становятся нелинейными. Соответствующую задачу теории упругости принято называть *геометрически нелинейной задачей*. Стремление применять более тонкостенные конструкционные материалы с повышенной прочностью, а также отказ от свойства относительной жесткости

тела требуют внесения соответствующих изменений как в содержание непосредственно модели идеально упругого тела, так и в основные зависимости линейной теории упругости. Таким образом, именно тонкостенные структуры составляют тот класс задач, для которого разработка методов нелинейного анализа с учетом взаимного влияния больших упругих перемещений и нелинейности конструкционных материалов имеет определяющее значение.

Проблемы механики деформирующихся тел по своей природе нелинейны. Следует указать некоторые главные причины появления нелинейных членов в основных зависимостях теории упругости:

- 1) учет геометрической нелинейности, когда перемещения конструкции вызывают значительные изменения ее геометрии, так что уравнения равновесия составляются для деформированного состояния;
- 2) нелинейность, определяемая нелинейностью связи между деформациями и напряжениями, т. е. физическая нелинейность материалов;
- 3) нелинейность механических характеристик взаимодействия элементов конструкции, т. е. конструкционная нелинейность;
- 4) комбинации различных категорий нелинейности.

При напряженно-деформированном состоянии (НДС) тел возникают геометрически нелинейные задачи, которые, в свою очередь, не обладают относительной жесткостью. Нельзя пренебрегать углами поворота элементов при вычислении длины и линейными деформациями в выражениях для углов поворота при выводе зависимостей между деформациями и перемещениями.

В общем случае геометрическая и конструкционная нелинейности носят одновременный характер. Однако их часто можно рассматривать отдельно, независимыми одна от другой, поскольку в применяемой области редко однозначные нелинейные эффекты появляются одновременно. Результаты расчета в рамках линейной теории не всегда достаточно точны, что может неблагоприятно отразиться на надежности конструктивной системы или ее экономичности. Поэтому в таких случаях для того, чтобы сделать реальные выводы о НДС конструктивных систем при статических и динамических воздействиях необходимо применение нелинейной теории, которая может послужить как для оценки оправданности применения, так и для точности, обеспечиваемой использованием линейной теории. Основные направления развития нелинейного анализа в настоящее время развиваются в двух направлениях: совершенствование расчетных моделей сложных систем в целях обеспечения точности и адекватность нелинейного анализа и разработка эффективных и экономичных алгоритмов анализа, что дает возможность его проведения с приемлемой затратой средств и времени.

Современная теория анализа механики сплошной среды и инженерного конструирования на основе метода конечных элементов (МКЭ) разработана в такой степени, что может быть эффективно применена для решения весьма сложных нелинейных задач. В ее основе лежит сформировавшаяся теория механики континуальных сред, отработанные приемы дискретизации структур, эффективные численные методы формирования и решения больших систем нелинейных уравнений. Однако трудоемкость нелинейного анализа, в основе которого находятся многошаговые, или итерационные алгоритмы, несоизмеримо выше трудоемкости линейного анализа [2].

Анализ нелинейных систем представляет собой непрерывный процесс моделирования. Поэтому очень важно, чтобы каждый элемент расчетной модели либо находился в условиях, аналогичных условиям исходной системы, в противном случае каждая неточность, допущенная при моделировании, влечет непредсказуемое накопление ошибок. Далее, преодолев затруднения математической формулировки нелинейной модели, исследователь сталкивается с целым рядом вопросов, ответы на которые получить оказывается достаточно сложно. К их числу относятся: выбор алгоритма решения, поскольку апробированный аппарат линейного анализа уже не может быть использован; отсутствие твердой уверенности в том, что решение является единственным; затруднительность или невозможность проверки результатов физическим экспериментом; существование лишь немногих правил контроля, дающих уверенность в правильности решения.

Поскольку все решения нелинейного анализа строятся на основе тех или иных инкрементных теорий, приходится мириться с неизбежной погрешностью каждого шага и накоплением погрешности в процессе счета [3].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В основе современных достижений нелинейного анализа лежит накопленный опыт рационального моделирования сложных структур. Понятие «моделирование», основанное на близости реальной конструкции и вычислительной модели, является тем фактором, который дает исследователю уверенность в полученном результате. Несмотря на то, что строгая математическая формулировка существования и сходимости решения редко возможна, на помощь приходит физический и численный эксперимент, в значительной степени восполняющий указанный пробел. При расчете сложных структур судовых механизмов важным элементом анализа является сравнение результатов, полученных с использованием различных моделей, методов и алгоритмов. Именно комплексность анализа является тем определяющим фактором, который дает уверенность в достоверности полученного результата. Наиболее сложными задачами механики деформируемого твердого тела являются нелинейные динамические проблемы, в процессе решения которых необходимо учитывать также изменяемость параметров НДС во времени. Сложность совместного учета нелинейных и динамических эффектов бесспорна. К тому же для решения ряда проблем до сих пор отсутствуют математические теории, которые могли бы более-менее точно описывать экспериментально определяемые особенности нелинейного нестационарного деформирования материалов.

Естественно, в подавляющем большинстве случаев для решения нелинейных динамических задач применимы только численные методы (например, МКЭ, наиболее важным преимуществом которого является наличие устойчивых методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений движения, описывающих движение судовых механизмов и составленных с учетом упругости звеньев [4]). По разработанному алгоритму был выполнен расчет и анализ динамического НДС состояния плоского механизма Посселье – Липкина (рис. 1). Этот механизм с легкими деталями, работающий на высоких скоростях, служит для построения прямолинейной траектории с помощью точки P . Он состоит из семи звеньев, изготовленных из стальных стержней круглого поперечного сечения диаметром 0,006 м, и стойки. Звенья соединены в шести вращательных кинематических парах. Точки A , C и P должны лежать на прямой, проходящей через точку A . При этом всегда удовлетворяется условие $AC \cdot AP = \text{const}$. При $AD = CD$ точка C должна двигаться по дуге окружности, а точка P — точно по прямой, но в связи с учетом упругости звеньев эти условия не выполняются [5]. Механизм имеет следующие геометрические размеры:

$$l_2 = l_6 = l_3 = l_7 = 0,3048 \text{ м}; l_4 = l_5 = 0,215 \text{ м}. \quad (1)$$

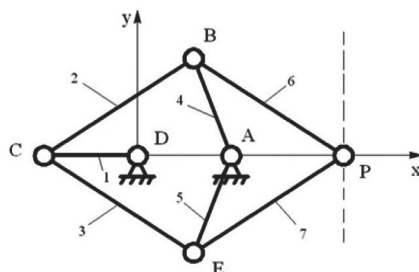


Рис. 1. Механизм Посселье – Липкина

Механизм состоит из восьми звеньев, считая стойку, с десятью вращательными кинематическими парами. На рис. 1 звенья механизма обозначены цифрами 1–7, а стойка принимается как нулевое звено. Предполагается, что механизм обладает одной степенью свободы, и закон движения ведущего звена 1 описывается формулой

$$\varphi_1 = \sin kt, \quad (2)$$

где φ_1 — угол поворота кривошипа относительно инерциальной системы отсчета XY , а t — время.

Известна кинематика механизма, полученная в обобщенных координатах [6]. Динамика данного механизма, упругие элементы которого выполнены из изотропного материала, в линейной постановке была исследована в работе [7]. Порядок системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) равен 36. Число итераций по времени — 67, а по нелинейности — 54 (рис. 2).

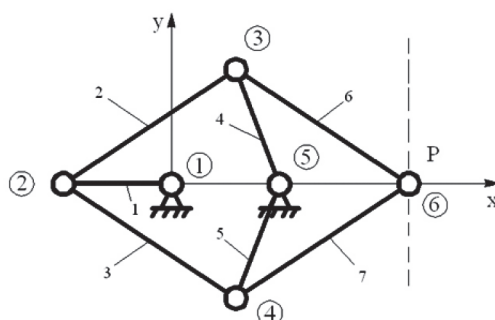


Рис. 2. Механизм Посселье – Липкина при конечно-элементном моделировании

Программа расчета тестирована на решение подобной задачи при малых перемещениях (рис. 3). При действии только сил инерции, когда все звенья считаются упругими вследствие упругости звеньев, безразмерное отклонение узла б, при угле поворота ведущего звена $\varphi_1 = \sin \Omega$, по разработанному алгоритму представлено на рис. 2. Здесь $\Omega = 7,5t$.

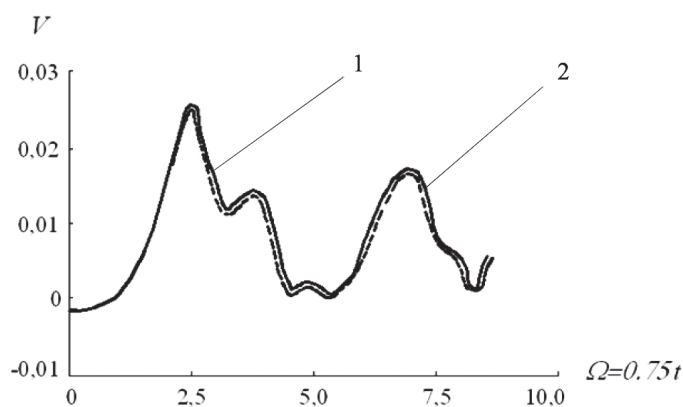


Рис. 3. Упругие перемещения V узла б

Условные обозначения:

1 — тестовая задача; 2 — по разработанному алгоритму

По закону Гука

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (3)$$

где $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_\xi, \chi, \chi_\eta, \chi_\zeta, \chi'_\xi, \chi'_\eta\}$ — деформации стержневого элемента; $[D]$ — матрица характеристик материала.

Упругие и геометрические параметры механизма, состоящего из анизотропных звеньев:

$$E_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}, E_2 = 0,9 \cdot 10^5 \text{ МПа}; G_1 = 80 \cdot 10^3 \text{ МПа};$$

$$G_2 = 40 \cdot 10^3 \text{ МПа}; G_3 = 63 \cdot 10^3 \text{ МПа}; \nu_1 = 0,25, \nu_2 = 0,13; \rho = 2640 \text{ кг/м}^3; d = 0,006 \text{ м}. \quad (4)$$

где E_1, E_2 — модули упругости; G_1, G_2, G_3 — модули упругости; ν_1, ν_2 — коэффициенты Пуассона; ρ — плотность; d — диаметр звеньев.

Результаты (Results)

В табл. 1 показано сравнение упругих перемещений, в табл. 2 — продольной и поперечной сил, нормальных напряжений, полученных при линейном и нелинейном расчете от действия сил инерции в изотропных звеньях механизма Посселе – Липкина [8].

Таблица 1

Максимальные продольные, поперечные и угловые перемещения в сечениях элементов с течением времени, от действия сил инерции в изотропных звеньях механизма

Δt	Продольные перемещения $u_z \cdot 10^{-4}$ (м) в конечном сечении 3-го элемента		Поперечные перемещения $v_z \cdot 10^{-4}$ (м) в 8-м сечении 2-го элемента		Угловые перемещения $\varphi_z \cdot 10^{-4}$ в конечном сечении 2-го элемента	
	линейный	нелинейный	линейный	нелинейный	линейный	нелинейный
2	0	0	0	0	0	0
3	-0,86	-1,03	0,13	0,16	-4,57	-5,48
4	2,22	2,67	0,84	1,00	-20,83	-24,99
5	14,08	16,90	2,46	2,95	-46,47	-55,76
6	32,65	39,18	4,71	5,65	-73,07	-87,68
7	52,83	63,39	7,23	8,68	-94,90	-113,89
8	68,52	82,22	9,87	11,85	-108,38	-130,06
9	74,23	89,07	12,54	15,05	-109,25	-131,11
10	66,65	79,98	14,39	17,27	-96,69	-116,03

Как видно в табл. 1, значения перемещений во 2-м и 3-м элементах, полученные при нелинейном расчете, превышают на 20–25 % значения перемещений, полученные при линейном расчете.

Таблица 2

Максимальные продольные, поперечные силы и нормальные напряжения в сечениях элементов, с течением времени от действия сил инерции в механизме Посселе – Липкина

Δt	$N \cdot 10^{-2}$ Н В 45-м сечении 1-го элемента		$Q \cdot 10^{-2}$ Н В 18-м сечении 2-го элемента		$\sigma \cdot 10^{-2}$ Па В 45-м сечении 1-го элемента	
	линейный	нелинейный	линейный	нелинейный	линейный	нелинейный
2	0	0	0	0	0	0
3	3,82	3,18	2,04	1,70	1,70	1,42
4	6,81	5,68	8,41	7,01	6,80	5,66
5	4,89	4,08	17,50	14,58	18,06	15,05
6	-2,17	-1,81	25,98	21,65	33,8	28,32
7	-17,08	-14,23	31,83	26,53	50,32	41,93
8	-39,08	-32,56	34,14	28,45	65,39	54,49
9	-64,17	-53,47	32,20	26,83	79,90	66,58
10	-86,78	-72,32	27,11	22,59	90,58	75,49

В остальных элементах, которые не показаны в таблице, перемещения увеличиваются на 14–18 %. Внутренние усилия и напряжения при учете геометрической нелинейности уменьшаются в 1-м и 2-м элементах на 21–23 %, в остальных элементах — на 15 %. Учет анизотропии, когда $\varphi = 0$, $\psi = 0$, приводит к увеличению перемещений на 50 %.

Обсуждение (Discussion)

Расчет динамики упругого пространственного параллельного манипулятора (ППМ) — рис. 4 — выполняется с помощью компьютерного моделирования. Для описания конечно-элементной модели ППМ разбиваем его на прямолинейные двухузловые стержневые элементы, соединенные

в узлах через кинематические пары. Для ППМ, состоящих в основном из отдельных стержневых звеньев, такое членение является естественным. Узлы ППМ имеют нумерацию в глобальной системе координат, которая служит для их идентификации в перечне узлов. Элементы имеют свои номера: начальный и конечный, с помощью которых, в свою очередь, производится их идентификация. При конечно-элементном динамическом моделировании ППМ разбиваем на девять прямолинейных двухузловых стержневых элементов с девятью узлами. У ППМ ведущими звеньями являются 1-й, 3-й, 5-й. Длины звеньев принимают следующие значения: $l_1 = l_3 = l_5 = 1,3$ м, $l_2 = l_4 = l_6 = l_1 \sqrt{2}$ м, $l_7 = l_8 = l_9 = 1,5l_1 / \cos 30^\circ$ м.

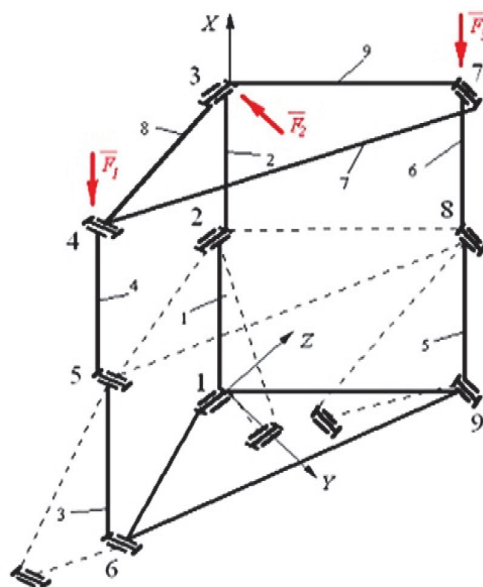


Рис. 4. Конечно-элементная модель ППМ

Инерциальная система координат XYZ жестко связана с неподвижным основанием, начало которой находится в узле 1. Кинематика манипулятора исследована матричным методом Дена-Вит–Хартенберга с шестью параметрами [9]. Координаты X , Y , Z узлов расчетной модели ППМ определены в глобальной системе координат. Звенья ППМ изготовлены из стальных стержней круглого поперечного сечения диаметром 0,006 м. Форма и размеры поперечного сечения, упругие свойства материалов постоянны. Размерами и конструкцией узлов пренебрегаются. Порядок СЛАУ — 54. Итерация по времени — 807. Итерация по нелинейности — 94. Для решения уравнений динамики используется метод Ньюмарка.

Шаг интегрирования по времени Δt выбирается исходя из величины угловой скорости ведущих звеньев и по параметрам, определяющим требуемую точность воспроизведения исследуемых процессов и устойчивость метода интегрирования. Внутри каждого шага по времени учитывается изменение как кинематических, так и упругих перемещений, скоростей и ускорений.

При исследовании динамик ППМ учтено упругое демпфирование в материалах звеньев [10]. Преобразование узловых перемещений и упругих реакций элемента из общей координатной системы в местные выполняется по разработанному алгоритму, находятся внутренние усилия и напряжения. На рис. 5–9 показаны изменения продольных и поперечных перемещений, продольных сил от совместного действия сил инерции и сосредоточенной силы, в звеньях ППМ — за время четырех оборотов ведущего звена.

Сравниваются значения, полученные при линейном и нелинейном расчете. У ППМ наибольшие продольные перемещения наблюдаются в элементах 4 и 7, поперечные — в элементах 4 и 6, нелинейные перемещения в элементах 2, 4 и 6 превышают линейные на 30 %, а в остальных элементах — на 15 %. Наиболее нагруженными в продольном направлении являются узловые поперечные сечения элементов 1–6.



Рис. 5. Изменение продольных и поперечных перемещений в звеньях ППМ при совместном действии сил инерции и сосредоточенной силы $F = e^{-\alpha t} \sin \omega t$

Условные обозначения:

- 1 — линейный изотропный; 2 — нелинейный изотропный;
3 — линейный анизотропный случай

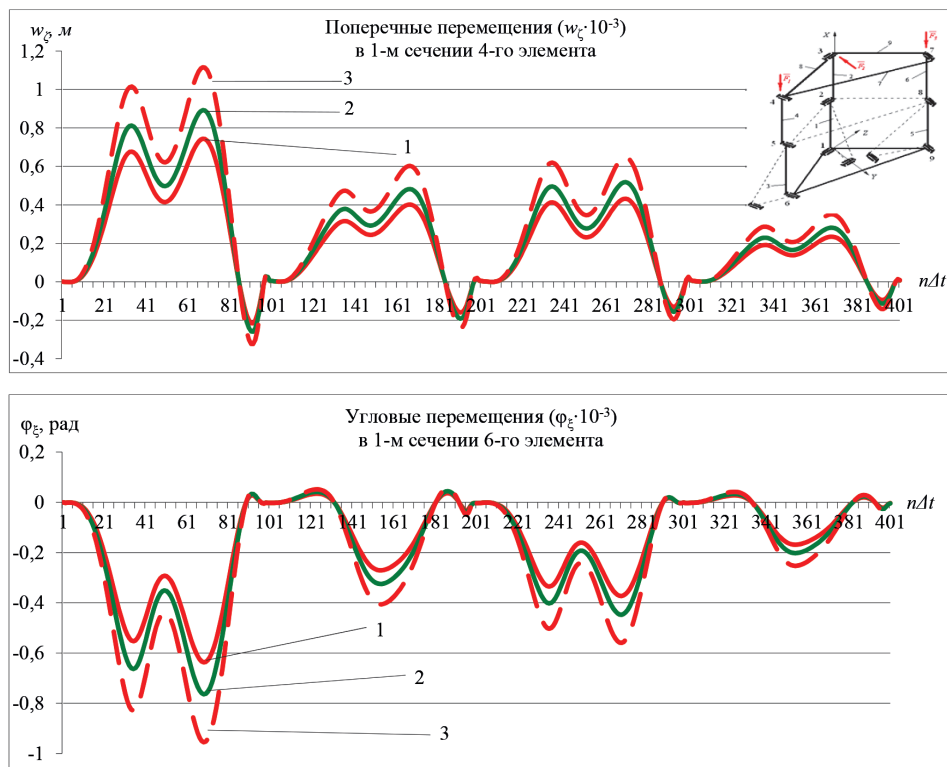


Рис. 6. Изменение поперечных и угловых перемещений в звеньях ППМ при совместном действии сил инерции и сосредоточенной силы $F = e^{-\alpha t} \sin \omega t$

Условные обозначения:

- 1 — линейный изотропный; 2 — нелинейный изотропный;
3 — линейный анизотропный случай

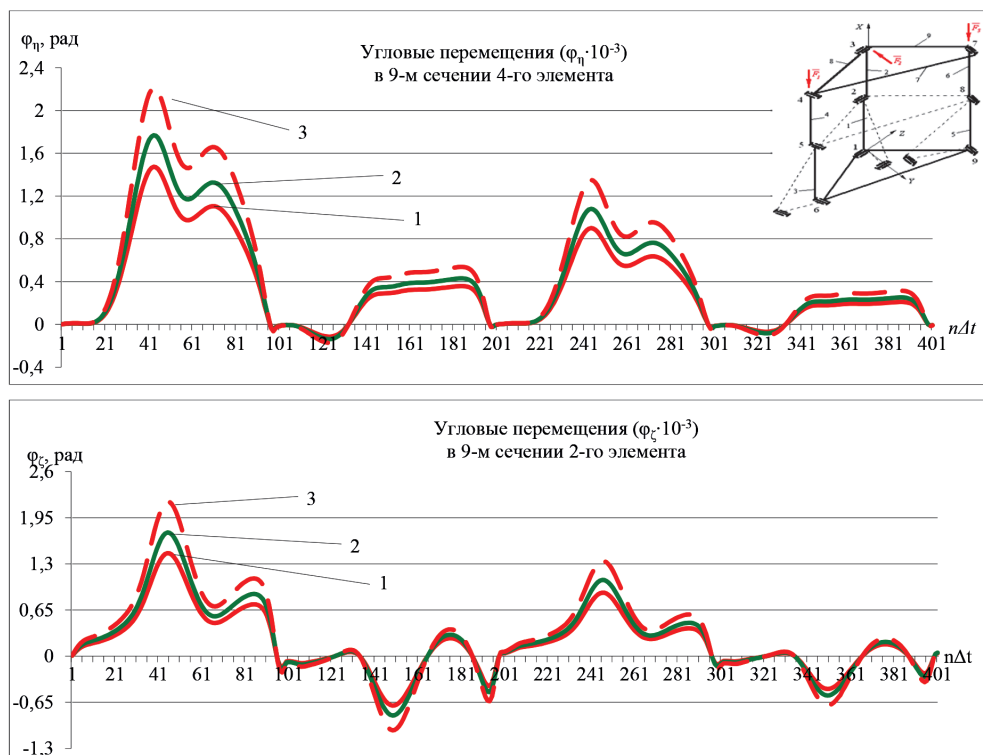


Рис. 7. Изменение угловых перемещений в звеньях ППМ при совместном действии сил инерции и сосредоточенной силы $F = e^{-at} \sin \omega t$

Условные обозначения:

- 1 — линейный изотропный; 2 — нелинейный изотропный;
3 — линейный анизотропный случай

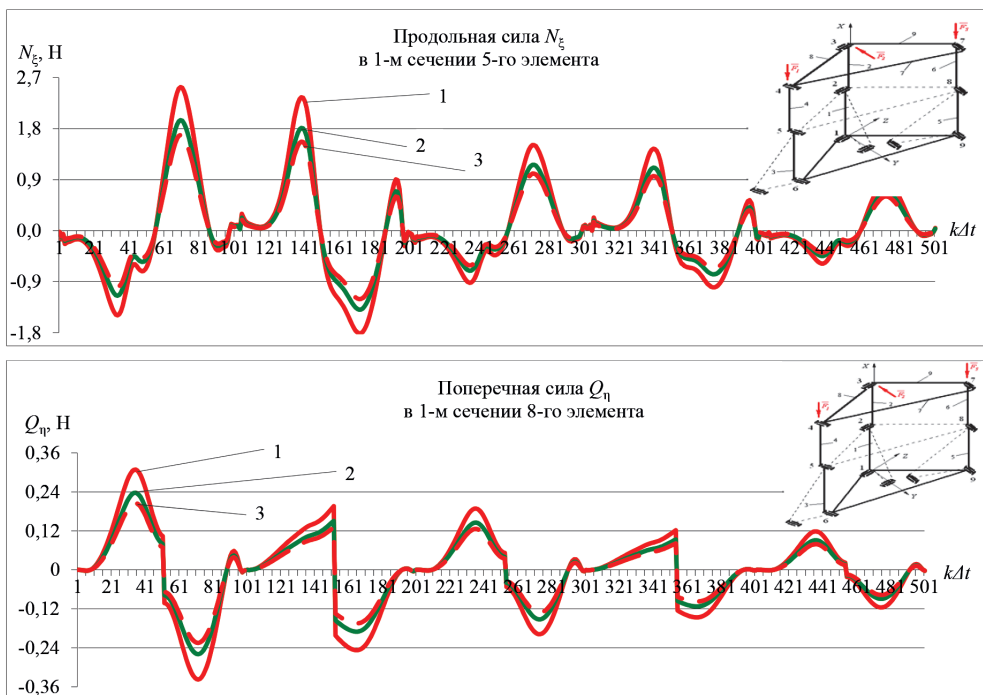


Рис. 8. Изменение продольных и поперечных сил по времени в звеньях ППМ при совместном действии сил инерции и сосредоточенной силы $F = e^{-at} \sin \omega t$

Условные обозначения:

- 1 — линейный изотропный; 2 — нелинейный изотропный;
3 — линейный анизотропный случай

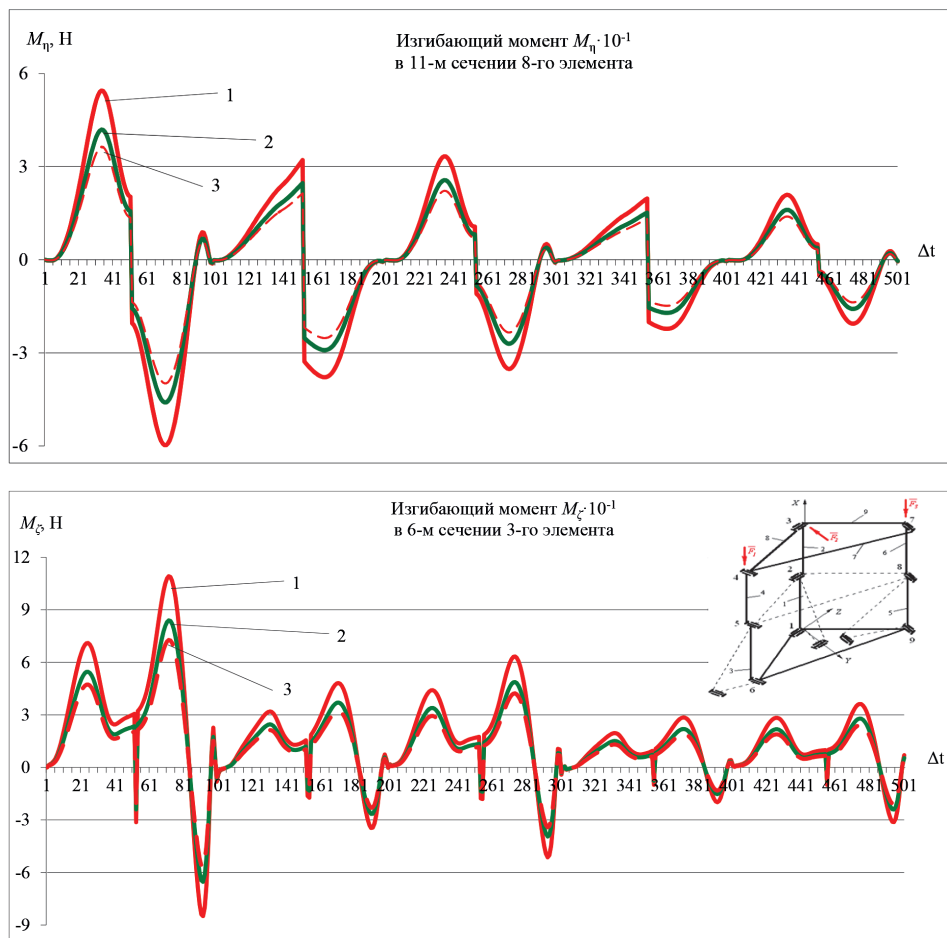


Рис. 9. Изменение изгибающих моментов по времени в звеньях ППМ при совместном действии сил инерции и сосредоточенной силы $F = e^{-\alpha t} \sin \omega t$

Условные обозначения:

1 — линейный изотропный; 2 — нелинейный изотропный;
3 — линейный анизотропный случай

Заключение (Conclusion)

В результате исследования динамического напряженно-деформированного состояния упругих плоских и пространственных судовых механизмов с геометрически нелинейными анизотропными звеньями выполнено следующее:

— предложена дискретная конечно-элементная расчетная динамическая модель упругого деформирования плоских и пространственных судовых механизмов с геометрически нелинейными анизотропными и изотропными звеньями;

— разработана конечно-расчетная схема решения основной системы нелинейных уравнений движения с переменными линейными и нелинейными матрицами жесткости, а также матрицы масс и упругого демпфирования системы с представлением коэффициентов последней через низшие частоты колебаний судовых механизмов с выбором для каждого механизма шага по времени, обеспечивающего устойчивость вычисления;

— проведены многовариантные расчеты значений динамических перемещений и внутренних усилий в элементах механизмов Посселье — Липкина, Брикарда и ППМ при различных исходных параметрах и скорости движения ведущего звена.

В результате проведенных расчетов установлено следующее:

1) учет геометрической нелинейности оказывает существенное влияние на упругое динамическое НДС механизмов: перемещения в элементах увеличиваются, а внутренние усилия уменьшаются на 14–30 %;

2) учет анизотропии материала приводит к увеличению перемещений до 1,5 раза;

3) с увеличением скорости движения ведущих звеньев механизмов растут значения всех компонентов перемещений и внутренних усилий, с ростом жесткости звеньев перемещения уменьшаются, а усилия увеличиваются;

4) во всех элементах механизма Посселье – Липкина нормальные напряжения — сжимающие, распределенные неравномерно по их длине; наиболее перегружены звенья 1, 5, наименее — звено 6;

5) с течением времени в звеньях механизма Брикарда от действия сил инерции максимальные нормальные напряжения разных знаков наблюдаются в концах элементов 2, 3 и 5, в элементах 1 и 4 они незначительны;

6) у ППМ наибольшие продольные перемещения наблюдаются в элементах 4 и 7, поперечные перемещения — в элементах 4 и 6. Нелинейные перемещения в элементах 2, 4 и 6 превышают линейные на 30 %, а в остальных элементах на 15 %.

Результаты и выводы исследований динамического НДС нелинейно-упругих плоских и пространственных судовых механизмов, с прямолинейными анизотропными звеньями дают возможность выбрать наиболее оптимальные параметры судовых механизмов, установить максимальные напряжения, усилия, упругие перемещения, скорости и ускорения в любых точках расчетных элементов судовых механизмов при различных видах нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов В. П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных конструкций / В. П. Агапов. — М.: Изд. АСВ, 2004. — 248 с.
2. Постнов В. А. Строительная механика корабля и теория упругости / В. А. Постнов, В. П. Суслов. — Л.: Судостроение, 1987. — 288 с.
3. Тарасов А. В. Рамная конструкция с несущими элементами нового типа сечения из тонколистовой оцинкованной стали / А. В. Тарасов, И. В. Тарасов, И. Я. Петухова // Международный научно-исследовательский журнал — 2015. — № 11-4 (42). — С. 131–134. DOI: 10.18454/IRJ.2015.42.110.
4. Иванов С. П. Динамическая устойчивость физически нелинейных пластинчатых систем при сжатии в двух направлениях / С. П. Иванов, О. Г. Иванов, А. С. Иванова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2018. — Т. 14. — № 2. — С. 132–141. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-2-132-141.
5. Huang C. C. An Explicit Method for Geometrically Nonlinear Dynamic Analysis of Spatial Beams / C. C. Huang, W. Y. Lin, F. Fujii, K. M. Hsiao // Proceedings of the World Congress on Engineering. — 2015. — Vol. 2. — P. 13–42.
6. Масанов Ж. К. Упругое напряженно-деформированное состояние пространственных параллельных манипуляторов / Ж. К. Масанов, Ж. Ж. Байгунчечков, К. З. Сартаев, Г. А. Абдраимова // Проблемы механики современных машин: материалы II науч.-международ. конф. — Улан-Удэ, 2003. — Т. 3. — С. 59–62.
7. Тлепиева Г. М. Анализ динамического и напряженно-деформированного состояния (НДС) плоского механизма Посселье – Липкина с нелинейно-упругими звеньями / Г. М. Тлепиева // Проблемы прочности транспортных конструкций и сооружений: тез. докл. Междунар. науч. конф. 17–18 октября 2008 г. — Алматы: КазАТК им. М. Тынышпаева, 2008. — С. 202.
8. Максименко В. Н. Теоретические основы методов расчета прочности элементов конструкций из композитов: учебник / В. Н. Максименко, И. П. Олегин. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. — 240 с.
9. Jobbágy D. Local buckling behaviour of thin-walled members with curved cross-section parts / D. Jobbágy, S. Ádány // Thin-Walled Structures. — 2017. — Vol. 115. — Pp. 264–276. DOI: 10.1016/j.tws.2017.02.026.
10. Султанов Т. Т. Напряженно-деформированное состояние морских буровых платформ на шельфе Каспийского моря / Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 960–974. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-960-974.

REFERENCES

1. Agapov, V. P. *Metod konechnykh elementov v statike, dinamike i ustoichivosti prostranstvennykh tonkostennykh konstruktsii*. M.: Izd. ASV, 2004.

2. Postnov, V. A., and V. P. Suslov. *Stroitel'naya mekhanika korablya i teoriya uprugosti*. L.: Sudostroenie, 1987.
3. Tarasov, A. V., I. V. Tarasov, and I.Y. Petukhova. "Frame construction with bearing elements of a new type of galvanized steel." *International Research Journal* 11-4(42) (2015): 131–134. DOI: 10.18454/IRJ.2015.42.110.
4. Ivanov, Sergey Pavlovich, Oleg Gennadevich Ivanov, and Anastasia Sergeevna Ivanova. "The dynamic stability of physically nonlinear plate systems under biaxial compression." *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings* 14.2 (2018): 132–141. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-2-132-141.
5. Huang, Chu Chang, Wen Yi Lin, Fumio Fujii, and Kuo Mo Hsiao. "An Explicit Method for Geometrically Nonlinear Dynamic Analysis of Spatial Beams." *Proceedings of the World Congress on Engineering*. Vol 2. 2015. 13–42.
6. Masanov, Zh. K., Zh. Zh. Baigunchekov, K. Z. Sartaev, and G. A. Abdraimova. "Uprugoe napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie prostranstvennykh parallel'nykh manipulyatorov." *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin: mater. II nauch. – mezhdun. konf.* Vol. 3. Ulan-Ude, 2003. 59–62.
7. Tlepieveva, G. M. "Analiz dinamicheskogo i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya (NDS) ploskogo mekhanizma Possel'e-Lipkina s nelineino-uprugimi zven'yami." *Problemy prochnosti transportnykh konstruksii i sooruzhenii: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Almaty: KazATK im. M.Tynyshpaeva, 2008.202.
8. Maksimenko, V. N., and I. P. Olegin. *Teoreticheskie osnovy metodov rascheta prochnosti elementov konstruksii iz kompozitov: uchebnik*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2006.
9. Jobbágy, Dávid, and Sándor Ádány. "Local buckling behaviour of thin-walled members with curved cross-section parts." *Thin-Walled Structures* 115 (2017): 264–276. DOI: 10.1016/j.tws.2017.02.026.
10. Sultanov, Timur T., and Gulnar M. Tlepiyeva. "Stress-deformed condition of the marine drilling platform on the shelf of the Caspian Sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 960–974. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-960-974.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Султанов Тимур Тулеугалиевич —
кандидат технических наук, доцент
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилева
010000, Республика Казахстан, Нур-Султан,
ул. Сатпаева, 3
e-mail: rumit78@mail.ru

Бурнаев Зуфар Русланович —
полковник, кандидат педагогических наук,
профессор
Национальный университет обороны
имени Первого Президента
Республики Казахстан - Елбасы
010000, Республика Казахстан, Нур-Султан,
ул. Туран, 72
e-mail: zyfarbyr@mail.ru

Тлепиева Гульнар Муратовна —
кандидат технических наук, доцент
Евразийский национальный университет имени
Л. Н. Гумилева
010000, Республика Казахстан, Нур-Султан,
ул. Сатпаева, 3
e-mail: tlepiyevagm@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sultanov, Timur T. —
PhD, associate professor
Eurasian National University named
after L. N. Gumilev
3 Satpaev Str., Nur-Sultan, 010000,
Republic of Kazakhstan
e-mail: rumit78@mail.ru

Burnaev, Zufar R. —
Colonel, PhD,
professor
National defense University named
after the First President of the Republic
of Kazakhstan-Elbasy
72 Turan Str., Nur-Sultan, 010000,
Republic of Kazakhstan
e-mail: zyfarbyr@mail.ru

Tlepiyeva, Gulnar M. —
PhD, associate professor
Eurasian National University named
after L.N. Gumilev
3 Satpaev Str., Nur-Sultan, 010000,
Republic of Kazakhstan
e-mail: tlepiyevagm@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 03 марта 2020 г.
Received: March 3, 2020.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389

IMPROVING THE MANAGEMENT EFFICIENCY OF COMBINED POWER PLANTS OF SHIPS

A. F. Burkov¹, V. V. Mikhanoshin², Nguyen Van Kha¹

¹ — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² — Maritime State University named after adm. G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

A scheme of a ship's combined power plant of a parallel type with a buffer energy source, which in general includes a battery, a diesel engine, a synchronous shaft generator, and propulsors in the form of adjustable pitch propeller, is proposed. A method for controlling this combined installation based on regulating the angle of rotation of the propeller blades as a function of the power on the propeller shaft and the degree of discharge of the battery, at which the load factor of the diesel engine remains virtually unchanged and equal to the nominal at any speed of the vessel and any static moment of resistance on the propeller shaft. This patented method, when it is used, can significantly reduce the fuel consumption by diesel engines on ships whose operation are characterized by frequent maneuvering and share modes, increase the operational life of diesel engines, and reduce harmful emissions into the atmosphere. A recommendation for choosing the ratios of powers and parameters of the used power sources is given. It has been shown that in general, it is advisable to choose these ratios of sources powers so that the charging power of the battery corresponds, minus losses in intermediate converters, to the rated power of the diesel engine. It has been graphically show that for any linear or stepwise power change on the propeller, due to the fact that the mechanical time constant is more than an order of magnitude higher than the electromagnetic one, the load factor of the diesel engine remains unchanged, and it operates at a constant speed with almost constant torque on the shaft.

Keywords: battery, shaft generator, main engine, propeller, combined power plant, ecology.

For citation:

Burkov, Alexey F., Victor V. Mikhanoshin, and Nguyen Khan Ha. "Improving the management efficiency of combined power plants of ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 381–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.

УДК 629.122

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ СУДОВ

А. Ф. Бурков¹, В. В. Миханошин², Нгуен Ван Ха¹

¹ — Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация

² — Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

Приведена разработанная на основании выполненных исследований схема судовой комбинированной энергетической установки параллельного типа с буферным источником энергии, которая в общем случае включает в себя аккумуляторную батарею, дизельный двигатель, валомашину синхронного типа и движители в виде гребного винта регулируемого шага. Предложен запатентованный способ управления разработанной комбинированной установкой, основанный на регулировании угла поворота лопастей винта регулируемого шага в функции мощности на гребном валу и степени разрядки аккумуляторной батареи, при котором коэффициент загрузки дизельного двигателя остается практически неизменным

и равным номинальному при любой скорости движения судна и любом статическом моменте сопротивления на гребном валу. Использование этого способа позволяет существенно сократить расход топлива дизельными двигателями на судах, эксплуатация которых характеризуется частыми маневренными и долевыми режимами, увеличить эксплуатационный ресурс дизельных двигателей, а также уменьшить вредные выбросы в атмосферу. Даны рекомендации по выбору соотношений мощностей и параметров используемых источников электроэнергии. Показано, что в общем случае эти соотношения мощностей источников целесообразно выбирать таким образом, чтобы зарядная мощность аккумуляторной батареи соответствовала, за вычетом потерь в промежуточных преобразователях, номинальной мощности дизельного двигателя. Графически показано, что при любом: линейном или ступенчатом изменении мощности на гребном винте, ввиду того, что механическая постоянная времени более чем на порядок превышает электромагнитную, коэффициент загрузки дизельного двигателя остается неизменным и он работает с неизменной частотой вращения и практически неизменным моментом на валу. Техническая реализация результатов выполненных исследований представляется целесообразной в первую очередь для судов прибрежного плавания.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, валогенератор, главный двигатель, гребной винт, комбинированная энергетическая установка, экология.

Для цитирования:

Бурков А. Ф. Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов / А. Ф. Бурков, В. В. Миханович, Нгуен Ван Ха // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 381–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.

Введение (Introduction)

Одним из приоритетных направлений в судостроении, анализ современного состояния и перспективы развития которого представлены в [1], является совершенствование судовых энергетических комплексов. К главным целям этого направления, помимо увеличения надежности, относится улучшение их экологических и экономических показателей, обусловленное в первую очередь ухудшающейся экологической обстановкой, значительный вклад в которую вносит морской и речной транспорт, а также высокой стоимостью горюче-смазочных материалов.

Вступившая в 2005 г. в силу «Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов» (МАРПОЛ) обязывает судовладельцев принимать меры по снижению вредных выбросов (окислов азота и серы, углекислого газа CO_2) в атмосферу главными энергетическими установками их судов. Кроме того, к принятию мер по сокращению и ограничению выбросов парниковых газов транспортом обязывает и Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций (ООН) об изменении климата, принятый 11 декабря 1997 г. Невыполнение этих требований приводит к штрафам судовладельцев или к тому, что многие порты для экологически грязных судов закрываются. Регламентация выбросов парниковых газов рассмотрена в [2].

Известен ряд способов и реализованных технических решений, применение которых позволяет, в той или иной степени, уменьшать расход топлива и сокращать вредные выбросы в атмосферу главными судовыми дизельными установками [3]–[5]. Кроме того, на экономию топливно-энергетических ресурсов оказывают влияние следующие факторы:

- уменьшение сопротивлений движению судов, совершенствование конструкции корпусов судов (у катамаранов, тримаранов, судов на подводных крыльях, глиссирующих судов и др.);
- применение дополнительных движителей, использующих силу ветра (классических парусов, роторных парусов (турбопарусов) Флеттнера) [6], [7];
- применение винтов регулируемого шага (установка таких движителей, как известно, позволяет оптимизировать работу главных двигателей и снижать вредные выбросы);
- применение альтернативных видов топлива с пониженным содержанием серы и других токсичных веществ (биодизельного топлива, биомазута, газообразного топлива: природного газа, метанола, аммиака, водорода и др.) [8];
- совершенствование конструкций дизельных установок (электронная регулировка системы топливоподачи, применение топливных присадок, очистка выхлопных газов с помощью систем

рециркуляции выхлопных газов, каталитических нейтрализаторов (конвертеров) и их фильтров-поглотителей (адсорберов).

Направления повышения эффективности и конкурентоспособности современных электроходов и перспективы их дальнейшего развития рассмотрены в [9]–[11] и др. Сравнительно новым способом повышения экологических и экономических показателей энергетических установок судов является применение комбинированных энергетических установок (КЭУ) [12], [13] последовательного (рис. 1, *а*) или параллельного (рис. 1, *б*) типа. В первом случае (см. рис. 1, *а*) дизель-генератор (ДГ) работает на полупроводниковый преобразователь (ПП), к которому, в свою очередь, подключена аккумуляторная батарея (АБ) и гребной электродвигатель (ГЭД). Посредством ПП осуществляется регулирование частоты вращения ГЭД, а также отбор тока от АБ и ее зарядка. Во втором случае (см. рис. 1, *б*) ДГ работает на гребной винт через разобщительную муфту М1 и суммирующий редуктор (СР). На гребной винт через СР и разобщительную муфту М2 также может работать и ГЭД, получающий питание от ПП.

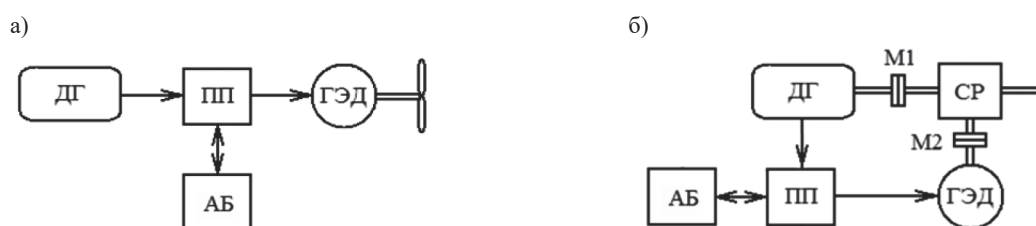


Рис. 1. Структурные схемы КЭУ:
а — последовательного типа; *б* — параллельного типа

Основным достоинством КЭУ последовательного типа является отсутствие механической связи между главным источником энергии (ДГ) и гребным винтом, жестко соединенным с ГЭД. Такое решение позволяет посредством управления ПП регулировать частоту вращения гребного винта в широком диапазоне и реверсировать направление его вращения, улучшая маневренные характеристики судов. ДГ при этом вращается практически с неизменной частотой в одном направлении. Недостатком этой схемы является относительно низкое значение коэффициента полезного действия (КПД), так как энергия, вырабатываемая дизелем, подвергается тройному преобразованию:

$$\eta = \eta_{\text{ДГ}} \cdot \eta_{\text{ПП}} \cdot \eta_{\text{ГЭД}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{ДГ}}$, $\eta_{\text{ПП}}$, $\eta_{\text{ГЭД}}$ — КПД дизель-генератора, ПП и ГЭД соответственно.

Преимуществом КЭУ параллельного (см. рис. 1, *б*) типа является ее повышенный КПД по сравнению со схемой, представленной на рис. 1, *а*, так как механическая энергия ДГ может быть передана на гребной винт напрямую, без промежуточных преобразований, за исключением небольших потерь в валопроводе и СР. Ее недостатком является необходимость регулирования топливоподачи в ДГ при каждом изменении частоты вращения гребного винта.

Работа дизельного двигателя в переходных режимах и режимах, отличных от номинального, характеризуется повышенным удельным расходом топлива, большим содержанием вредных веществ в выхлопных газах, ускоренным нагарообразованием и закоксовкой поршневых колец. Кроме того, для реверса гребного винта необходимо использовать или реверс-редуктор, или реверсивные дизели, которые сложнее и дороже обычных нереверсивных дизелей. Остановка судов с такими КЭУ осуществляется, как правило, за счет действия сил сопротивления воды (пассивным торможением). Поэтому путь, проходимый судном при таком пассивном торможении значительно больше, чем при активном торможении, когда остановка судна производится за счет реверса гребного винта. Соответственно в этой схеме больше и время остановки судна, которое характеризуется большей инерционной составляющей, и несколько худшей управляемостью, что сказывается, в свою очередь, на безопасности мореплавания. К очередным задачам дальнейшего развития КЭУ

относится совершенствование их систем управления с целью оптимизации эксплуатационных характеристик, улучшающих экологические и технико-экономические показатели.

Целью и задачами настоящего исследования представляется организация такого управления КЭУ, при котором обеспечивались бы экологические и технико-экономические показатели, соответствующие современным требованиям к пропульсивным установкам судов, функционирующим как в стационарных, так и в переходных режимах работы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На рис. 2 представлена предложенная структурная схема силового канала КЭУ с валомашинной (ВМ) и винтом регулируемого шага (ВРШ).

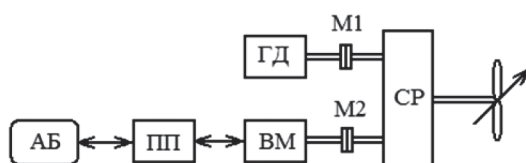


Рис. 2. Структурная схема КЭУ с ВМ и ВРШ:

ГД — главный (первичный) двигатель; М1 и М2 — разобщительные муфты;
АБ — аккумуляторная батарея; ПП — полупроводниковый преобразователь;
ВМ — обратимая валомашина; СР — суммирующий редуктор

В качестве движителя пропульсивной установки (см. рис. 2) используется ВРШ, частота вращения которого обеспечивается через редуктор рабочим ГД посредством муфты М1 или функционирующей системой «АБ–ПП–ВМ» через муфту М2. Необходимо отметить, что ВМ представляет собой синхронную машину, способную работать как в генераторном, так и в двигательном режиме. Способ управления судовой КЭУ, структурная схема которой представлена на рис. 2, защищен патентом на изобретение [14]. При проектировании и технической реализации КЭУ необходимым является решение вопросов, связанных с расчетом и выбором их компонентов. Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок представлен в [15]. К предпочтительному использованию в данном случае относятся АБ литий-ионного (Li-ion) или литий-железо-фосфатного (Li-Fe-PO₄ (LFP)) типа такой емкости и напряжения, при которых соответствующая зарядная мощность, определяемая по формуле, соизмерима с номинальной мощностью ГД $P_{ГД,ном}$:

$$P_z = U_z \cdot I_z, \quad (2)$$

где P_z — зарядная мощность АБ, Вт; U_z — среднее зарядное напряжение, В; I_z — зарядный ток, А. Зарядный ток I_z определяется из следующего соотношения:

$$I_z = k_{AB} \cdot C_{AB}, \quad (3)$$

где k_{AB} — коэффициент, зависящий от типа используемой АБ, 1/ч; C_{AB} — емкость АБ, А·ч.

При наличии АБ существенно больших необходимых емкостей время их подзарядки от ДГ пропорционально увеличивается, так как мощности ДГ являются ограниченными. Такой вариант выбора АБ целесообразно использовать в случаях, когда основная зарядка АБ производится от береговой сети. Выбор АБ меньшей указанного значения емкости приводит к тому, что скорость их подзарядки от ДГ увеличивается. При этом экономический эффект от применения такой энергоустановки очевидно будет невысоким, так как АБ, ввиду ее небольшой емкости, будет сравнительно быстро разряжаться.

Рассматриваемый способ управления судовой КЭУ реализуется следующим образом. Судно приводится в движение путем подачи напряжения от АБ на ВМ, работающую в двигательном режиме. Разобщительная муфта М1 ГД при этом размыкается, а М2 замыкается. Разгон судна, движение и регулирование частоты вращения ВРШ производят с помощью ПП до тех пор, пока напряжение АБ не уменьшится до некоторого заданного значения, после чего датчик напряжения (ДН)

АБ подает сигнал системе дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) (на рис. 2 не показаны) на запуск ГД с предварительным подключением его к СР, приведя разобщительную муфту М1 ГД в замкнутое состояние. С момента соединения ГД с гребным ВРШ регулирование его упора производится путем изменения шага ВРШ при постоянной частоте вращения вала ГД.

Поддержание момента сопротивления на валу ГД постоянным и равным номинальному в этом случае осуществляется следующим образом. При моменте сопротивления на гребном винте, меньшем номинального момента ГД, ВМ посредством системы ДАУ переводится в режим генератора, от которого при помощи ПП и его системы управления отбирается такое количество электроэнергии, которое необходимо для создания дополнительного тормозного момента, равного разности между номинальным моментом ГД и моментом сопротивления ВРШ. Определение системой ДАУ степени загрузки ГД производится автоматически по показаниям датчиков температуры его выхлопных газов. Вырабатываемый ВМ в генераторном режиме переменный ток

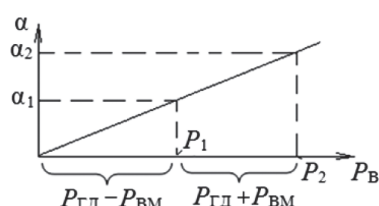


Рис. 3. Принцип управления ВРШ в функции мощности на гребном валу P_v

посредством ПП выпрямляется и поступает в судовую сеть и / или на зарядку АБ. Таким образом, при малых углах разворота лопастей ВРШ, меньших α_1 (рис. 3), ВГ работает в генераторном режиме, а управление энергоустановкой заключается в одновременном согласованном воздействии на шаг гребного винта и на ПП.

Углом α_1 на рис. 3 обозначен угол поворота лопастей ВРШ, соответствующий номинальной нагрузке ГД (P_1), углом α_2 — максимальный угол ВРШ, соответствующий максимальному его упору; $P_{ВМ}$ — активная мощность валомашины.

Для получения скорости судна большей той, которая соответствует углу α_1 поворота лопастей ВРШ, ВМ, посредством системы ДАУ, переводится в двигательный режим. Разобщительная муфта М2 при этом находится во включенном положении. ПП с системой управления обеспечивает частотное регулирование данного электродвигателя, источником электроэнергии которого служит АБ. Таким образом, увеличивая крутящий момент ВМ и одновременно соответствующим образом шаг гребного винта, обеспечивается увеличение скорости судна.

Результаты (Results)

На рис. 4 представлены графики зависимостей мощности на гребном валу (винте) P_v и мощности валомашины $P_{ВМ}$ в функции времени t при выполнении условия $P_{ГД}(t) = P_{ГДном}(t)$, согласно которым мощность на гребном валу (винте) изменяется в зависимости от условий эксплуатации (навигационной обстановки).

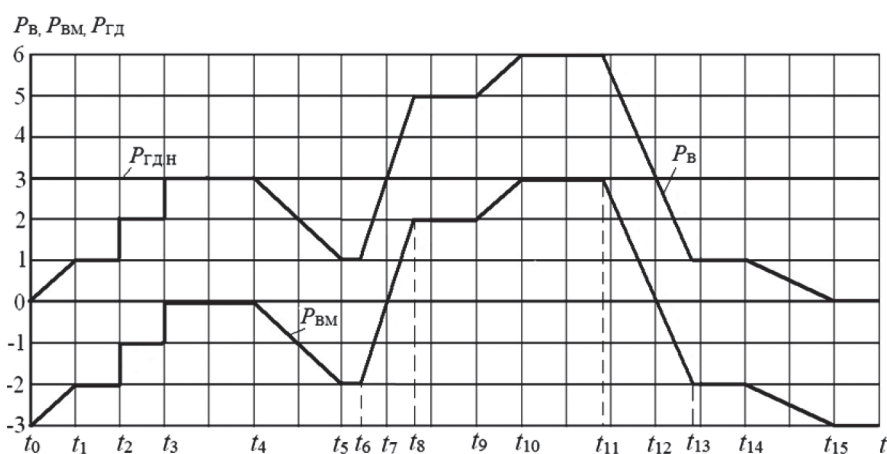


Рис. 4. Графики зависимостей $P_v = f(t)$ и $P_{ВМ} = f(t)$ при $P_{ГД}(t) = P_{ГДном}(t) = \text{const}$

Мощность на гребном винте $P_{\text{в}}(t)$ (см. рис. 4) определяется в виде

$$P_{\text{в}}(t) = P_{\text{ГД}}(t) + P_{\text{ВМ}}(t). \quad (4)$$

При кратковременной стоянке судна у причала (момент времени t_0 — см. рис. 4) потребляемая гребным винтом мощность $P_{\text{в}} = 0$. При этом мощность $P_{\text{ГД ном}}$, вырабатываемая ГД посредством валомашины, работающей в режиме валогенератора (мощность $P_{\text{ВМ}}$ (см. рис. 4) имеет отрицательные значения), за вычетом потерь, идет на заряд силовых АБ. При линейном законе изменения (увеличения) мощности $P_{\text{в}}(t)$ на одну ступень в интервале времени $t_0 - t_1$ по аналогичной линейной зависимости на такую же величину снижается и мощность $P_{\text{ВМ}}$, вырабатываемая ВМ. На временном интервале $t_1 - t_2$ потребляемая гребным винтом мощность $P_{\text{в}}(t)$ соответствует одной единице уровня мощности (ступени), а вырабатываемая ВМ мощность $P_{\text{ВМ}}(t)$ соответствует двум ступеням. Таким образом, 1/3 мощности $P_{\text{ГД ном}}$ поступает на гребной винт, а 2/3 мощности $P_{\text{ГД ном}}$ преобразуется посредством ВМ, работающей в генераторном режиме, в электрическую энергию, которая расходуется на судовые электропотребители и на подзарядку АБ.

Аналогичным образом производится распределение энергии ГД и на других временных интервалах, но всегда таким образом, что коэффициент его загрузки остается неизменным и равным номинальному значению. На временном интервале $t_3 - t_4$ вся вырабатываемая ДГ мощность $P_{\text{ГД}}$ расходуется гребным винтом. При этом валомашина ВМ посредством разобщительной муфты М2 (см. рис. 2) находится в отключенном состоянии. На интервале времени $t_{10} - t_{11}$ (рис. 4) гребной винт развивает номинальную мощность ($P_{\text{в}} = P_{\text{в.ном}}$). При потребляемой гребным винтом мощности $P_{\text{в}}$, большей, чем мощность $P_{\text{ГД}}$ ГД (интервал $t_7 - t_{12}$ (см. рис. 4)), ВМ переводится в двигательный режим с питанием от АБ через ПП. Таким образом, в зависимости от потребляемой гребным винтом мощности $P_{\text{в}}$, ВМ переводится в генераторный или в двигательный режим работы. При этом регулирование ее мощности производится таким образом, что коэффициент загрузки ГД остается неизменным и равным номинальному значению.

Вследствие того, что постоянная времени электрической части схемы более чем на порядок меньше постоянной времени ее механической части, зависимость мощности ВМ $P_{\text{ВМ}}(t)$ практически повторяет зависимость мощности гребного винта $P_{\text{в}}(t)$ (эквидистантна ей), отличаясь от нее на постоянную величину, равную номинальной мощности ГД $P_{\text{ГД}}$. При снижении напряжения АБ и / или ее емкости до минимально допустимого значения ее разрядка в данном режиме прекращается до тех пор, пока ее напряжение посредством подзарядки не увеличится до допустимого значения по мере наличия избыточной мощности ГД. Угол поворота α лопастей ВРШ при этом ограничивается углом α_1 , соответствующим мощности на винте, равной номинальной мощности ГД. Зарядка АБ производится обычно в ночное время суток при стоянке судна у причала с подачей электроэнергии от береговой сети, что позволяет экономить топливный и моторесурс ГД судна.

Как правило, рабочий режим традиционных пассажирских малотоннажных судов включает разгон судна, движение с установившейся скоростью в течение 7–50 мин, движение по инерции со скоростью менее номинальной, торможение и стоянку, составляющие 7–5 мин. Таким образом, в течение рабочего дня ГД работает в номинальном, долевых (частичных) и холостого хода эксплуатационных режимах, неоднократно переходя из одного на другой.

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты выполненных исследований обладают научной новизной, заключающейся в способе управления предложенной судовой КЭУ (см. рис. 2), позволяющем обеспечить номинальные режимы работы ГД в условиях переменных нагрузок на движителе (гребном валу), и вследствие этого достичь значений экологических показателей, соответствующих статическим номинальным режимам работы ГД. КЭУ рекомендуются для внедрения на судах внутрипортового и прибрежного плавания, работающих с частыми маневренными режимами. Повышенные, по сравнению с изготовлением обычных дизельных установок, капитальные вложения на постройку предложенных КЭУ представляются оправданными вследствие того, что суда с КЭУ име-

ют более низкие эксплуатационные расходы, обусловленные в первую очередь использованием дизельных ГД меньшей (практически вдвое) установленной мощности, работающих практически в номинальных режимах во всех допустимых диапазонах изменения нагрузок на гребных валах. Способствуют дальнейшему развитию судовых пропульсивных комплексов, включающих гребные электрические установки, в частности КЭУ.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложена судовая КЭУ, которая с описанным способом управления может быть использована как на малотоннажных судах с ориентировочными мощностями на гребных валах до 250 кВт, так и на более крупных судах (например, паромах) с мощностями на гребных валах до 3 МВт, работающих с частыми маневренными режимами.
2. При внедрении предложенной КЭУ достигается повышение эффективности использования ГД, уменьшение потребления горюче-смазочных материалов и сокращение вредных выбросов в атмосферу.
3. Применение предложенной КЭУ с использованием дополнительного источника энергии в виде АБ позволяет уменьшить установленную мощность ГД, обеспечивая при этом стационарную работу последнего с номинальными параметрами, и как следствие, сократить эксплуатационные расходы, повысить качество и комфортность обслуживающего персонала и пассажиров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Игнатьева Н. А.* Современное состояние и перспективы развития судостроения в российской федерации / Н. А. Игнатьева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — № 4-6. — С. 1159–1162.
2. *Иванченко А. А.* Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
3. *Adamkiewicz A.* Technologies reducing exhaust gas emissions from large marine diesel engines / A. Adamkiewicz, K. Kołwzan // Silniki Spalinowe. — 2007. — Vol. 46. — No. SC3. — Pp. 79–90.
4. *Myśków J.* Marine engine exhaust gas emission after treatment system concept / J. Myśków, T. Borkowski, M. Bludzuweit, W. Frohlingsdorf // Journal of KONES Powertrain and Transport. — 2011. — Vol. 18. — No. 4. — Pp. 307–315.
5. *Патров Ф. В.* Снижение концентраций оксидов азота в отработавших газах судовых дизелей при использовании водотопливных эмульсий / Ф. В. Патров, О. С. Вахромеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. — Серия: Морская техника и технология. — 2010. — № 1. — С. 141–146.
6. *Craft T. J.* Back to the future: Flettner-Thom rotors for maritime propulsion / T. J. Craft, H. Iacovides, N. Johnson, B. E. Launder // THMT-12. Proceedings of the Seventh International Symposium On Turbulence Heat and Mass Transfer. — Palermo, Italy: 2012. — Pp. 1104–1113. DOI: 10.1615/ICHMT.2012.ProcSevIntSympTurbHeatTransfPal.1150.
7. *Craft T. J.* Dynamic performance of Flettner rotors with and without Thom discs / T. J. Craft, H. Iacovides, B. E. Launder // Proc. 7th International Symp. on Turbulence & Shear Flow Phenomena. — Ottawa, 2011. — Paper 6C-3.
8. *Ведрученко В. Р.* Альтернативные виды топлива для судовых дизелей / В. Р. Ведрученко, И. И. Маляхов. — Омск: Омский институт водного транспорта (филиал) ФБОУ ВПО «НГАВТ», 2013. — 173 с.
9. *Bolvashenkov I.* Possible ways to improve the efficiency and competitiveness of modern ships with electric propulsion systems / I. Bolvashenkov, H. G. Herzog, A. Rubinraut, V. Romanovskiy // 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). — IEEE, 2014. — Pp. 1–9. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007120.
10. *Bolvashenkov I.* Promising ships propulsion systems with electric motion and steering gondolas / I. Bolvashenkov, H. G. Herzog, A. Rubinraut, V. Romanovskiy // 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). — IEEE, 2014. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844086.

11. Романовский В. В. Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.
12. De Breucker S. Possible applications of plug-in hybrid electric ships / S. De Breucker, E. Peeters, J. Driesen // 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. — IEEE, 2009. — Pp. 310–317. DOI: 10.1109/ESTS.2009.4906530.
13. Bennabi N. Hybrid propulsion systems for small ships: Context and challenges / N. Bennabi, J. F. Charpentier, H. Menana, J. Y. Billard, P. Genet // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). — IEEE, 2016. — Pp. 2948–2954. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732943.
14. Пат. 2483972 Российская Федерация, МПК В60W 20/00. Способ управления судовой комбинированной энергетической установкой / В.В. Миханович; заяв. и патентообладатель Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского. — № 2011140644/11; заявл. 06.10.2011; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.
15. Романовский В. В. Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок / В. В. Романовский, М. А. Сюбаев, И. М. Болвашенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 172–178. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-172-178.

REFERENCES

1. Ignatyeva, N. A. “Current status and prospects of shipbuilding development in the Russian Federation.” *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* 4-6 (2016): 1159–1162.
2. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
3. Adamkiewicz, Andrzej, and K. Kołwzan. “Technologies reducing exhaust gas emissions from large marine diesel engines.” *Silniki Spalinowe* 46.SC3 (2007): 79–90.
4. Myśków, Jarosław, T. Borkowski, M. Bludszuweit, and W. Frohlingsdorf. “Marine engine exhaust gas emission after treatment system concept.” *Journal of KONES* 18 (2011): 307–315.
5. Patrov, Fedor Vladimirovich, and Oleg Sergeyevich Vakhromeev. “The reduction of nitrogen oxide concentration in exhaust gases of ship diesel engines applying oil-to-water emulsions.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2010): 141–146.
6. Craft, T. J., H. Iacovides, N. Johnson, and B. E. Launder. “Back to the future: Flettner-Thom rotors for maritime propulsion.” *THMT-12. Proceedings of the Seventh International Symposium On Turbulence Heat and Mass Transfer*. Palermo, Italy: 2012. 1104–1113. DOI: 10.1615/ICHMT.2012.ProcSevIntSympTurbHeatTransfPal.1150.
7. Craft, Timothy J., Hector Iacovides, and Brian E. Launder. “Dynamic performance of Flettner rotors with and without Thom discs.” *Proc. 7th International Symp. on Turbulence & Shear Flow Phenomena*. Ottawa, 2011. Paper 6C-3.
8. Vedruchenko, V. R., and I. I. Malakhov. *Al'ternativnye vidy topliva dlya sudovykh dizelei*. Omsk: Omskii institut vodnogo transporta (filial) FBOU VPO «NGAVT», 2013.
9. Bolvashenkov, Igor, Hans-Georg Herzog, Alexander Rubinraut, and Victor Romanovskiy. “Possible ways to improve the efficiency and competitiveness of modern ships with electric propulsion systems.” *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, 2014. 1–9. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007120.
10. Bolvashenkov, Igor, Hans-Georg Herzog, Alexander Rubinraut, and Victor Romanovskiy. “Promising ships propulsion systems with electric motion and steering gondolas.” *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE, 2014. 1–4. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844086.
11. Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. “Special structure of the electrical propulsion plant with DC-grid system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.
12. De Breucker, Sven, Eefje Peeters, and Johan Driesen. “Possible applications of plug-in hybrid electric ships.” *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. IEEE, 2009. 310–317. DOI: 10.1109/ESTS.2009.4906530.
13. Bennabi, N., J. F. Charpentier, H. Menana, J. Y. Billard, and P. Genet. “Hybrid propulsion systems for small ships: Context and challenges.” *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE, 2016. 2948–2954. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732943.

14. Mikhanoshin, V. V. *Sposob upravleniya sudovoi kombinirovannoi energeticheskoi ustanovkoi*. RU 2 483 972, IPC B 60W 20/00. Russian Federation assignee. Publ. 10 June 2013.

15. Romanovskii, V. V., M. A. Syubaev, and I. M. Bolvashenkov. "Selection basic data of electrical machines for electrical propulsion systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(34) (2015): 172–178. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-172-178.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурков Алексей Федорович —

доктор технических наук, профессор
Дальневосточный федеральный университет
125993, Российская Федерация, Москва,
ул. Тверская, 11
e-mail: burkov.22@mail.ru

Миханошин Виктор Викторович —

доцент
Морской государственный университет
им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50 а.
e-mail: tetrodoksina@mail.ru

Нгуен Ван Ха —

аспирант
Научный руководитель:
Бурков Алексей Федорович
Дальневосточный федеральный университет
125993, Российская Федерация, Москва, ул.
Тверская, 11
e-mail: burkov.22@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burkov, Alexey F. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Far Eastern Federal University
11 Tverskaya Str., Moscow, 125993,
Russian Federation
e-mail: burkov.22@mail.ru

Mikhanoshin, Victor V. —

Associate professor
Maritime State University
named after admiral G.I. Nevelskoy
50 Verkhny Portovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: tetrodoksina@mail.ru

Nguyen Van Kha —

Postgraduate
Supervisor:
Burkov, Alexey F.
Far Eastern Federal University
11 Tverskaya Str., Moscow, 125993,
Russian Federation
e-mail: burkov.22@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 марта 2020 г.

Received: March 9, 2020.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401

METHOD FOR ELIMINATING HOMONYMOUS AREAS IN WARNING CONTROL OF THE ELECTRICAL SYSTEM

N. V. Shirokov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The solution of an important scientific and technical problem namely the development of methods and tools used for warning control of the electrical system is considered in the paper. Thus warning control is considered as one of the possible variants for object operation, carried out on the basis of its technical condition. The proposed approach involves the use of parametric or structural adaptation of the electrical system to emerging failures, carried out on the basis of the results of technical diagnostics. The description of the technical condition of the system by means of a mathematical model, given in the form of a field of efficiency, built in the space of parameters of its functional blocks is substantiated.

The homonymous areas of proper functioning characterized by a specific diagnostic parameter are defined in the paper. It has been shown that if the technical condition of the system belongs to this area, then in this mode it is operational, and diagnostic tools will identify its failure. The formal possibility of allocation of these areas from the field of efficiency is proved; a technique for their allocation is presented.

A method for homonymous areas exclusion, developed by the author for the purposes of warning control is proposed in the paper. This approach reduces the error of the first kind that occurs when determining the technical condition of the electrical system. According to the method, described in the paper, the modes in which the state of the electrical system belongs to the homonymous areas are excluded from the diagnosis process.

As an example of the practical implementation of the proposed method, its application in the case of transition of one of the generator units of the electric power system of the floating crane to the motive mode of operation is considered. The considered example of preventive management is an independent scientific and technical task. An original algorithm for its solution based on the method of the homonymous areas elimination is presented in the paper.

Keywords: warning control, homonymous area, segmentation of a field of efficiency, distinctive features of modes, reverse power.

For citation:

Shirokov, Nikolaj V. "Method for eliminating homonymous areas in warning control of the electrical system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.

УДК 621.316:658.58

МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ ОМОНИМИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Н. В. Широков

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрено решение важной научно-технической проблемы — разработки методов и средств, используемых для предупредительного управления электротехнической системой. При этом предупредительное управление рассматривается как один из возможных вариантов эксплуатации объекта, осу-

ществляемых исходя из его технического состояния. Предлагаемый подход предполагает использование параметрической или структурной адаптации электротехнической системы к возникающим отказам, осуществляемой на основании результатов технического диагностирования. Обосновано описание технического состояния системы посредством математической модели, заданной в виде области работоспособности, построенной в пространстве параметров ее функциональных блоков. Дано определение омонимичных областей правильного функционирования, характеризуемых конкретным диагностическим параметром. Показано, что, если техническое состояние системы принадлежит этой области, то в данном режиме она работоспособна, а средства диагностирования будут идентифицировать ее отказ. Обоснована формальная возможность выделения этих областей из области работоспособности и представлена методика их выделения. Предложен метод исключения омонимичных областей, разработанный автором в целях предупредительного управления. Данный подход обеспечивает уменьшение ошибки первого рода, возникающей при определении технического состояния электротехнической системы. Согласно описанному в статье методу, из процесса диагностирования исключают режимы, в которых состояние электротехнической системы принадлежит омонимичным областям. В качестве примера практической реализации предложенного метода рассмотрено его применение в случае перехода одного из генераторных агрегатов электроэнергетической системы плавкрана в двигательный режим работы. Рассмотренный пример предупредительного управления представляет собой самостоятельную научно-техническую задачу. В статье представлен оригинальный алгоритм решения данной задачи на основе метода исключения омонимичных областей.

Ключевые слова: предупредительное управление, омонимичная область, сегментация области работоспособности, отличительные признаки режимов, обратная мощность.

Для цитирования:

Широков Н. В. Метод исключения омонимичных областей в предупредительном управлении электротехнической системой / Н.В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.

Введение (Introduction)

Предупредительное управление электротехнической системой (ЭТС), в соответствии с требованиями к ГОСТу 19176–85 от 01.05.1997 г., осуществляется в случае отклонения ее контролируемых параметров от номинальных значений. Оно предназначено для изменения состояния и режимов работы технических средств, осуществляемых с целью предотвращения наступления аварийной ситуации. В работе [1] предупредительное управление определено как процесс воздействия на систему, в результате которого после достижения контролируемыми параметрами предельного значения или срабатывания защиты ее техническое состояние будет принадлежать усеченной области правильного функционирования. При этом предполагается параметрическая или структурная адаптация ЭТС к возникшим отказам, осуществляемая на основе результатов диагностирования ее элементов и связей между ними. Таким образом, предупредительное управление представляет собой один из вариантов эксплуатации системы, реализуемых исходя из ее технического состояния, описание которого удобно осуществлять с помощью области работоспособности. Указанная модель обычно задается в виде совокупности граничных точек, как показано в статьях [2]–[4], или в виде гиперповерхности, характеризуемой допустимыми значениями первичных параметров $\{\bar{X}\}$, как представлено в работе [5]. Для решения задач параметрического синтеза или технической диагностики область работоспособности обычно аппроксимируют с помощью более простых геометрических фигур в соответствии с подходами, изложенными в публикациях [6], [7].

Наиболее часто область работоспособности заменяют гиперпараллелепипедом или гипербрусом с гранями, параллельными осям координат. В этом случае каждая грань задает допуск на определенный параметр, который не зависит от величины других сигналов. Считается, что для идентификации работоспособного состояния ЭТС необходимо, чтобы все первичные параметры находились в пределах своих допусков, как показано в статьях [8]–[10]. В технической диагностике этот метод называют *контролем по независимым допускам*. Как следует из материалов, изложенных в работах [11]–[13], этот очень простой в практической реализации подход имеет существенный недостаток, связанный с резким снижением достоверности диагностирования

при увеличении числа первичных параметров. Согласно результатам, представленным в работе [5] для случая, когда количество контролируемых сигналов равно пяти, методическая погрешность может превышать 90 %.

Существенное снижение методической погрешности при определении технического состояния ЭТС достигается посредством аппроксимации области работоспособности линейными гиперповерхностями [14]. Последнее позволяет перейти к диагностированию по взаимозависимым допускам, частным случаем которого является *метод некомпенсированной погрешности*, описанный в работе автора [15]. Другой способ, позволяющий наиболее точно представить область работоспособности, заключается в отдельной аппроксимации всех образующих ее гиперповерхностей посредством полиномиальных зависимостей. В работах [5], [16] показано как с помощью использования математического аппарата R -функций формируют результирующую аналитическую зависимость, описывающую область работоспособности с высокой точностью. В этом случае определение технического состояния СЭТ осуществляется с максимальной достоверностью. Некоторые подходы, реализующие данный способ, описаны в работах [2], [5], [17]. При этом снижение методической погрешности диагностирования, сопровождающееся усложнением технических средств, приводит к необходимости использования относительно больших объемов памяти. Особенно критичным для целей предупредительного управления является увеличение времени диагностирования по сравнению с контролем по независимым допускам. Указанные недостатки обуславливают необходимость разработки специальных подходов к выбору контролируемых параметров и диагностических признаков для решения оперативных задач управления ЭТС с учетом их текущего технического состояния. При этом, в соответствии с материалами, изложенными в статье [18], под ЭТС будем понимать совокупность связанных между собой электротехнических устройств, объединенных процессом генерации, распределения, преобразования, потребления электрической энергии и управления этими процессами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Непосредственное использование информации о границе области работоспособности, заданной в пространстве первичных параметров $\{X\}$, в процессе управления ЭТС может вызывать ряд трудностей, связанных с жесткими требованиями к производительности и объему памяти используемой аппаратуры. При этом возникает необходимость в применении большого числа датчиков, измеряющих различные физические величины и средств коммуникации получаемой информации, что может на практике серьезно усложнить технические средства управления и даже привести к снижению эксплуатационной надежности. В этой связи в качестве контролируемых параметров обычно выбирают легко измеряемые и достаточно интегрированные величины, зависящие от технического состояния многих элементов. Такими сигналами являются фазовые переменные $\{\bar{Z}\}$, представляющие собой функционалы от первичных параметров $\{X\}$. Как показано в работе [2]:

$$Z_{j\min}^v \leq Z_j^v = F_j^v(\bar{X}) \leq Z_{j\max}^v, \quad v = \overline{1, h}, \quad (1)$$

где $Z_{j\max}^v$; $Z_{j\min}^v$; Z_j^v — соответственно максимально допустимое, минимально допустимое и текущее значения j -го внутреннего параметра; $F_j^v(X)$ — оператор связи первичных параметров ЭТС с ее параметрами $\{\bar{Z}\}$.

Указанное упрощение часто приводит к существенному снижению достоверности диагностирования, а следовательно, к снижению качества управления ЭТС в экстремальных ситуациях. Это объясняется тем, что в областях работоспособности таких систем имеются участки, характеризующиеся контролируемым параметром Z_j^v . На практике это может привести к ошибочному признанию вышедшим из строя работоспособного блока ЭТС и неправомерным действиям системы управления. В то же время глубина диагностирования в целях предупредительного управления ЭТС определяется степенью ее адаптации к возникающим неисправностям, так как самоорганизация систем, как правило, осуществляемая в виде изменений структурных связей функциональ-

ных блоков, представляется правомерным построение области работоспособности в пространстве их параметров.

Для повышения достоверности диагностирования выполним в соответствии с работой [1] сегментацию области работоспособности H , построенной в пространстве параметров $\{Z\}$ таким образом, чтобы отделить усеченные области правильного функционирования w_j^q , характеризуемые параметром Z_j^v . Усеченные области правильного функционирования, характеризуемые диагностическим параметром, назовем *омонимичными областями* (от греч. *homos* — одинаковый и *опута* — имя). Если точка S , соответствующая техническому состоянию системы, принадлежит подобной области w_j^q , то в этом режиме ЭТС работоспособна, а средства, использующие для контроля данный диагностический параметр, будут идентифицировать отказ объекта диагностирования. В остальных случаях параметр Z_j^v корректно отражает техническое состояние системы. Таким образом, наличие омонимичных областей приводит к неоднозначности результатов диагностирования.

В работе [1] показано, что область работоспособности может быть представлена как сумма усеченных областей правильного функционирования:

$$\forall w_j^q \in H, \quad H = \bigcup_{j=1}^q w_j^q, \quad j = \overline{1, q} \quad (2)$$

Тогда используя аддитивные свойства области H , вытекающие из выражения (2), запишем

$$H = \bigcup_{i=1}^v w_i^v + \bigcup_{j=1}^g w_j^g; \quad i = \overline{1, v}; j = \overline{1, g}, \quad (3)$$

где $\bigcup_{j=1}^g w_j^g$ — омонимичные области в составе области работоспособности.

Из выражения (3) следует, что существует объективная возможность отделения омонимичной области от области работоспособности. При этом во всех режимах, соответствующих области $H^v = \bigcup_{i=1}^v w_i^v$, применение диагностического параметра приведет к достоверным результатам диагностирования. Сущность метода заключается в том, что при использовании диагностического параметра, определяющего неработоспособное состояние ЭТС, из процесса диагностирования исключают области $\bigcup_{j=1}^g w_j^g$. В этой связи предлагаемый подход назовем *методом исключения омонимичных областей*.

Алгоритм, реализующий настоящий метод, заключается в том, что на этапе проектирования системы предупредительного управления строят область работоспособности управляемого объекта в пространстве внутренних параметров $\{\bar{Z}\}$, выделяют омонимичные области $\bigcup_{j=1}^g w_j^g$ и заносят в память блока управления. Контролируют техническое состояние ЭТС в процессе эксплуатации и при достижении параметром Z_j^v предельно допустимого значения осуществляют проверку режима работы системы. Если ЭТС не работает в режиме, соответствующем одной из омонимичных областей, то она признается неработоспособной, то выполняются необходимые воздействия на систему, обеспечивающие ее переход в режим правильного функционирования.

В случае, когда техническое состояние ЭТС принадлежит одной из областей w_j^g , несмотря на предельно допустимые значения диагностического параметра Z_j^v , она признается работоспособной, и предупредительных управляющих воздействий не требуется. Данный подход достаточно прост в реализации, обладает большим быстродействием и требует на порядок меньший объем памяти вычислительных устройств, чем при диагностировании с использованием информации о границе области работоспособности, заданной в пространстве первичных параметров.

Результаты (Results)

Практическое применение метода исключения омонимичных областей рассмотрим на примере ситуации, возникающей при отказе одного из первичных двигателей, параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов (ГА) судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) плав-

крана «LUFT 1» [19], которую, несомненно, можно классифицировать как ЭТС. Тогда номинальные мощности ГА равны между собой и составляют по 900 кВт каждый ($N_1 = N_2 = 900$ кВт), а величина потерь, и, следовательно, обратная мощность каждого агрегата равна 140 кВт ($N_{обр1} = N_{обр2} = 140$ кВт); максимальная разность развиваемых мощностей ГА, обеспечиваемая подсистемой распределения активных нагрузок составляет 63 кВт ($|N_1 - N_2| = 63$ кВт); максимальная нагрузка СЭЭС составляет 947 кВт ($P_{\max} = 947$ кВт). Для данного режима работы, с учетом подходов, изложенных в [1], область работоспособности H можно представить следующим образом:

$$H = B_z \cap M_y \cap M_u. \quad (4)$$

При этом допусковая область B_z , образованная пересечением области предельных значений мощностей ГА и допусковой области P_z , заданной ограничением $|N_1 - N_2| \leq 63$ кВт, в данном случае имеет форму поверхности, задаваемой системой неравенств:

$$\begin{cases} -140 \text{ кВт} \leq N_1 \leq 900 \text{ кВт}; \\ -140 \text{ кВт} \leq N_2 \leq 900 \text{ кВт}; \\ |N_1 - N_2| \leq 63 \text{ кВт}. \end{cases} \quad (5)$$

Допусковая область B_z представлена на рис. 1. Область M_y характеризует внешние условия работоспособности рассматриваемой системы и представляет собой отображение выходных параметров СЭЭС $\{\bar{Y}\}$ в пространстве параметров $\{\bar{Z}\}$:

$$\Phi_{yz} : D_y \rightarrow M_y; M_y = \bigcap_{i=1}^n M_i. \quad (6)$$

В рамках настоящего исследования рассматриваем только один показатель качества работы СЭЭС — величину генерируемой мощности $N_{\text{общ}} = N_1 + N_2$. Поскольку исходя из закона сохранения энергии, суммарная мощность системы, состоящей из двух ГА, не может быть отрицательной и большей, чем сумма номинальных мощностей агрегатов, область M_y может быть задана неравенством $0 \leq N_{\text{общ}} \leq 1800$ кВт.

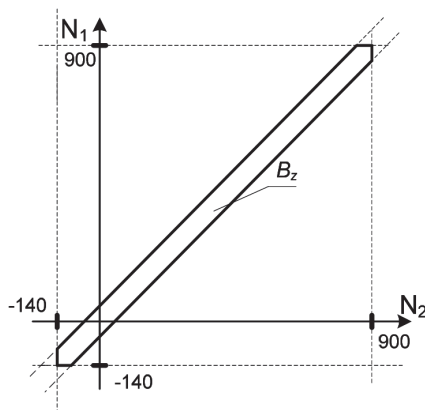


Рис. 1. Допусковая область B_z внутренних параметров N_1, N_2

Область M_y представлена на рис. 2, а. Область M_u характеризует пространство управляющих воздействий системы. Она представляет собой отображение пространства управляющих сигналов в пространстве параметров $\{\bar{Z}\}$:

$$\Phi_{uz} : D_u \rightarrow M_u, M_u = \bigcap_{c=1}^e M_c. \quad (7)$$

Величина мощности, генерируемой системой $N_{\text{общ}}$, задается активной нагрузкой сети P , а следовательно, $e = 1$, и область M_u отображает неравенство $0 \leq P \leq 947$ кВт. Активная нагрузка сети, не имеющей дополнительного источника генерации, не может быть отрицательной, а максимальное ее значение по условию равно 947 кВт.

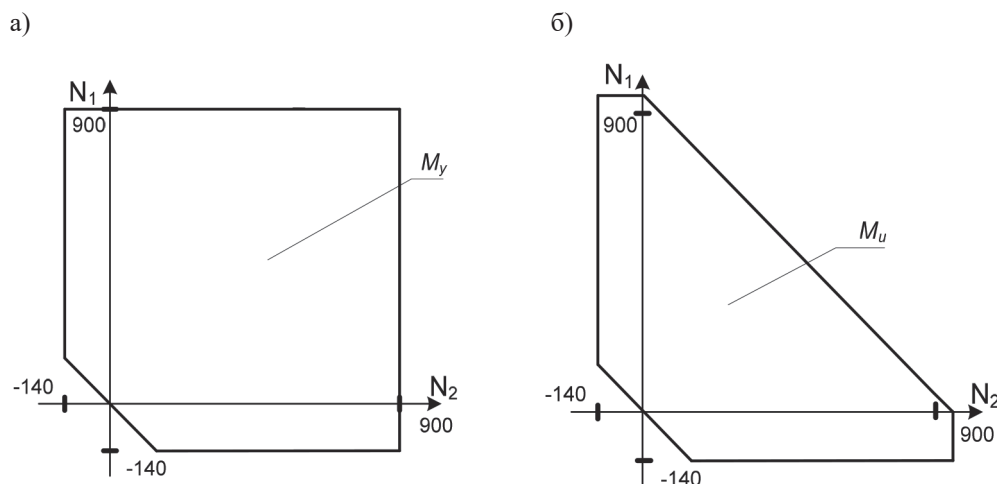


Рис. 2. Область M_y — отображение внутренних параметров N_1, N_2 в пространстве выходных параметров $N_{\text{общ}}$ (а); область M_u — отображение внутренних параметров N_1, N_2 в пространстве входных параметров P (б)

Область M_u представлена на рис. 2, б. Область работоспособности H , образуемая в виде пересечения областей B_z, M_y, M_u , представлена на рис. 3. При этом полагаем, что переходные процессы, связанные с синхронизацией генераторов и включением их на параллельную работу, закончились; отсутствуют другие источники, способные генерировать электроэнергию в сеть; регуляторы первичных двигателей имеют идеальные характеристики и работают без перерегулирования и без инерции.

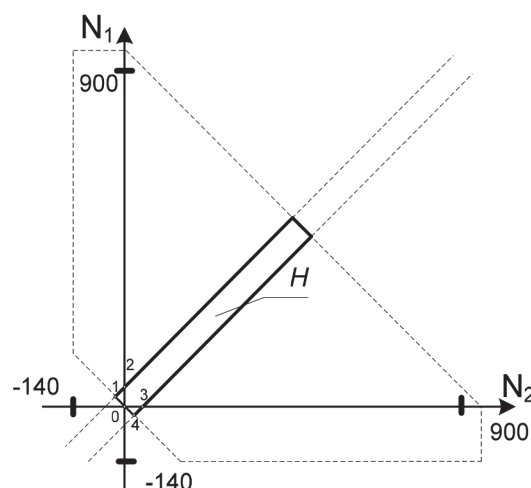


Рис. 3. Область работоспособности H , построенная в пространстве внутренних параметров N_1, N_2

Главным диагностическим параметром Z_j^v отказа топливной системы приводного двигателя ГА является переход генератора в двигательный режим и появление обратной мощности $N_{\text{обр}}$. Это интегральная, легко контролируемая электрическая величина, зависящая от многих первичных параметров. Для фиксации момента неисправности топливной системы в пространстве параметров $\{X\}$ пришлось бы контролировать количество поступающего топлива в единицу времени, качество топлива, его температуру и вязкость, количество и качество поступающего в систему воздуха, положение рейки топливного насоса, а также осуществлять ряд других относительно сложных и дорогих измерений. Поэтому в современных устройствах предаварийного управления СЭЭС в качестве

диагностического параметра используют величину $N_{обр}$, однако при этом перед разработчиками аппаратуры встает трудноразрешимая задача.

С одной стороны, при переходе ГА в двигательный режим нагрузка на второй агрегат практически удваивается и при этом сеть дополнительно нагружается обратной мощностью. Данная ситуация зачастую приводит к перегрузке работоспособного источника электроэнергии, его остановке и обесточиванию судна. В связи с этим возникает необходимость в мгновенном отключении неисправного агрегата до того момента, когда он будет перегружать сеть. С другой стороны, существуют такие режимы работы СЭЭС, при которых один из исправных генераторов начинает потреблять энергию из сети. В этом случае применение диагностического признака — появление обратной мощности — приведет к ошибочному отключению работоспособного ГА.

Попытка найти парето-оптимальное решение в данной ситуации привела к тому, что средства защиты срабатывают не в момент перехода ГА в двигательный режим, а значительно позднее. В соответствии с Правилами Российского морского регистра судоходства, предельная величина обратной мощности, при которой отключают генераторы переменного тока, составляет 15 % от номинальной мощности ГА для агрегатов, использующих в качестве приводного двигателя дизель и 6 %, если первичный двигатель — это турбина. В этом случае обычно используют задержку времени при срабатывании защиты, которая может превышать 10 с.

Использование такого диагностического признака во многих случаях позволяет избежать ошибочного отключения работоспособного ГА. Однако, с другой стороны, в момент отказа система защиты срабатывает позже, чем следует, что существенно снижает ее эффективность, ведет к возникновению аварийной ситуации на судне. Такая проблема особенно актуальна для судов, имеющих в составе СЭЭС мощные потребители, соизмеримые по мощности с генераторами, судов, оборудованных мощными подъемно-транспортными механизмами, плавкранов. В остальных случаях защита от обратной мощности, как правило, настраивается на срабатывание при $N_{обр} = 0,1N_{ном}$ с выдержкой времени 5–6 с. Задача предупредительного управления для подобной ситуации — обеспечить отключение неработоспособного ГА, по крайней мере, в момент перехода генератора в двигательный режим до момента появления обратной мощности.

На рис. 3 диагностический параметр, характеризуемый появлением обратной («отрицательной») мощности, отображается по осям ординат и абсцисс, поэтому рассечем область H двумя плоскостями по осям координат. При этом образуются две усеченные области правильного функционирования w_1^g и w_2^g , ограниченные точками 0–3–4 и 0–1–2 соответственно. Эти области имеют вид треугольников и так как они соответствуют переходу генератора в двигательный режим в работоспособном состоянии, являются омонимичными. Параметры w_1^g и w_2^g заносятся в память устройства предупредительного управления. При появлении обратной мощности величины N_1 и N_2 определяют контрольную точку S , отображающую состояние системы в текущий момент времени, осуществляют проверку на принадлежность точки S пространству w_1^g при условии, что $N_1 < 0$ и пространству w_2^g при $N_2 < 0$. Если контрольная точка не принадлежит омонимичной области, то формируют сигнал на отключение генератора, перешедшего в двигательный режим, а если нет, то отключение блокируют. Для этих целей можно воспользоваться хорошо известными подходами вычислительной геометрии: методом относительности, сравнительных площадей, векторным методом, методом геометрического луча [20].

Приведенное на рис. 4 изображение представляет собой *идеальную модель* области работоспособности H , построенную в пространстве параметров N_1 и N_2 . При создании систем предупредительного управления необходимо учитывать принятые ранее следующие допущения.

Во-первых, в двигательный режим генератор может перейти не только при работе в параллель, но и в момент синхронизации с сетью. Одним из условий успешного подключения ГА является совпадение частот работающих агрегатов, осуществляемое с заданной точностью. При этом допустимая разница частот Δf обычно лежит в пределах $0,05\text{Hz} \leq \Delta f \leq 0,5\text{Hz}$. В момент подключения за счет явления синхронизма частоты уравниваются, а значит, один генератор начинает вра-

щаться быстрее, получая энергию от другого. Если частота напряжения подключаемой машины меньше, чем у работающей на нагрузку, то этот генератор однозначно переходит в двигательный режим, дополнительно нагружая сеть. Если нагрузка работающего агрегата близка к холостому ходу и происходит подключение ГА с более высокими оборотами, то включаемый на параллельную работу генератор может взять на себя всю нагрузку, переводя работающий в двигательный режим. Этот процесс быстротечен (обычно протекает в течение нескольких десятых долей секунды), но его следует учитывать при разработке систем предупредительного управления. Работа генератора с кратковременным переходом в двигательный режим в момент включения на параллельную работу описывается усеченной областью правильного функционирования, которая тоже является омонимичной. Обозначим ее как w_3^g .

Во-вторых, современные суда часто оснащены грузоподъемными механизмами, работающими с рекуперацией энергии в сеть. При этом, например, грузовая лебедка в режиме травления может не только взять на себя всю нагрузку, но и перевести все работающие генераторы в двигательный режим. Использование в качестве диагностического параметра величины обратной мощности приведет к отключению хотя бы одного работоспособного агрегата. Омонимичную область, характеризующую работу ГА в двигательном режиме в момент рекуперации энергии в сеть обозначим как w_4^g .

В-третьих, на многих судах имеются потребители, например, компрессоры, мощность которых сопоставима с мощностью одного из генераторов. Отключение этих потребителей приводит к резкому уменьшению нагрузки в сети. При этом мощности, развиваемые каждым агрегатом, резко снижаются. За счет инерционности регуляторов и различия в статизме скоростных характеристик первичных двигателей один из ГА может перейти в двигательный режим, хотя все его параметры соответствуют требованиям нормативно-технической документации. Омонимичную область, характеризующую работу генератора с обратной мощностью вследствие существенного и скачкообразного снижения нагрузки сети, обозначим как w_5^g . Таким образом, условие отключения ГА можно сформулировать в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_1 < 0) \wedge \{(S \notin w_1^g) \vee (S \notin w_3^g) \vee (S \notin w_4^g) \vee (S \notin w_5^g)\}; \\ (N_2 < 0) \wedge \{(S \notin w_2^g) \vee (S \notin w_3^g) \vee (S \notin w_4^g) \vee (S \notin w_5^g)\}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Так как каждая усеченная область правильного функционирования w_3^g, w_4^g, w_5^g характеризует свой режим работы СЭЭС, который можно идентифицировать по *отличительным признакам* x_3, x_4, x_5 , то выражение (8) можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} (N_1 < 0) \wedge \{(S \notin w_1^g) \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5\}; \\ (N_2 < 0) \wedge \{(S \notin w_2^g) \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5\}, \end{array} \right. \quad (9)$$

где x_3, x_4, x_5 — отличительные признаки режимов работы системы.

Для СЭЭС такими признаками могут быть следующие:

x_3 — логический сигнал (например, логическая единица), сформированный в момент замыкания генераторного автоматического выключателя синхронизируемого генератора, который сохраняется до момента приема нагрузки обоими агрегатами;

x_4 — «сухой контакт» вспомогательных контактов органов управления или контактора рекуперативного торможения;

x_5 — «сухой контакт» вспомогательных контактов органов управления или контактора управления потребителем электроэнергии, мощность которого соизмерима с мощностью генератора.

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма, реализующего метод исключения омонимичных областей в предупредительном управлении применительно к рассматриваемому примеру. По команде «Пуск» производится ввод данных, характеризующих состояние СЭЭС: N_1, N_2, x_3, x_4, x_5 . Осуществляется исключение омонимичных областей из процесса диагностирования. С этой целью оценивают логические сигналы, характеризующие режим работы системы x_3, x_4, x_5 , а затем

проверяют принадлежность точки S , заданной параметрами N_1, N_2 , пространствам w_1^g, w_2^g . Если СЭЭС не работает в режиме, характеризующем одну из омонимичных областей функционирования, то контролируют момент перехода генератора в двигательный режим, отключая ГА в момент появления обратной мощности.

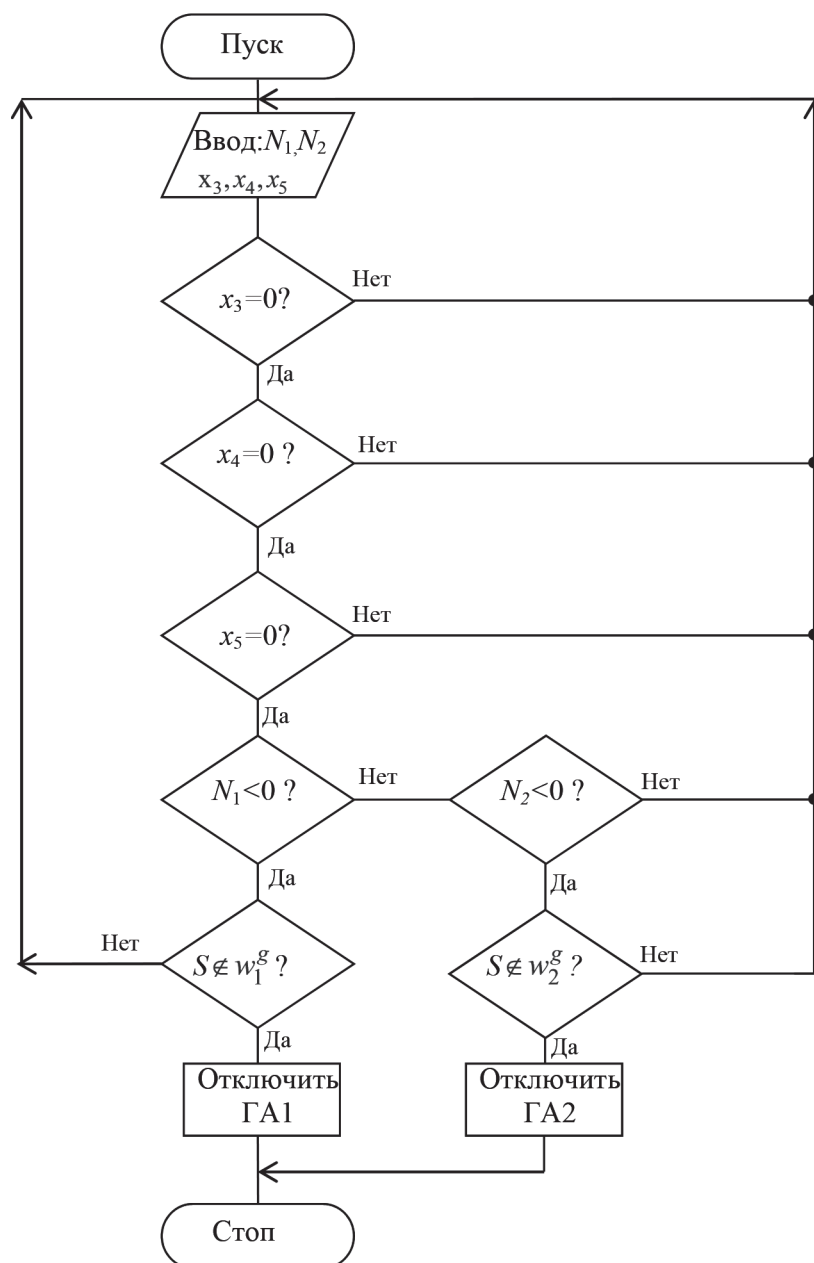


Рис. 4. Блок-схема алгоритма предупредительного управления СЭЭС при переходе ГА в двигательный режим работы

Время, необходимое для реализации предложенного алгоритма предупредительного управления, в существенной степени зависит от используемого оборудования. Однако при использовании обычных процессоров типа ATMEGA64A и векторного метода для проверки принадлежности точки $S(N_1, N_2)$ треугольникам, заданным точками 0–1–2 и 0–3–4, оно составляет, менее 0,08 с, включая время размыкания автоматического выключателя. С учетом инерционности первичных двигателей можно считать, что отключение неработоспособного агрегата будет происходить мгновенно в момент перехода его генератора в двигательный режим, что позволит избежать перегрузки сети обратной мощностью.

Обсуждение (Discussion)

Предлагаемый подход предполагает использование в целях экстренного диагностирования информации о границе области работоспособности ЭТС, заданной в пространстве параметров фазовых переменных $\{\bar{Z}\}$, что позволяет сократить время принятия решения и существенно упростить техническую реализацию средств предупредительного управления. Метод исключения омонимичных областей позволяет повысить достоверность результатов функционального диагностирования и исключить ложные отключения работоспособных элементов системы.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение первичных параметров $\{\bar{X}\}$ при определении технического состояния ЭТС в ряде случаев приводит к недопустимой величине времени диагностирования в целях предупредительного управления. В этой связи наиболее предпочтительно использовать в качестве контролируемых параметров фазовые переменные $\{\bar{Z}\}$.
2. Сегментация области работоспособности ЭТС, построенной в пространстве внутренних параметров $\{\bar{Z}\}$, позволяет выделить омонимичные области, в которых применение контролируемого параметра Z_j^y приводит к появлению ошибок первого рода.
3. Предложенный метод исключения омонимичных областей позволяет повысить достоверность диагностирования ЭТС по сравнению с применяемым в управлении методом контроля ТС по независимым допускам за счет существенного сокращения ошибок первого рода.
4. Для предупредительного управления СЭЭС в случае перехода одного из ГА в двигательный режим работы может быть применен алгоритм, реализующий метод исключения омонимичных областей, обеспечивающий отключение неработоспособного агрегата непосредственно в момент появления обратной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Широков Н. В. Предупредительное управление судовой электроэнергетической системой при отказе источников электроэнергии / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.
2. Саушев А. В. Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметров их элементов / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.
3. Катусева Я. В. Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности / Я. В. Катусева, Д. А. Назаров // Информационные технологии. — 2015. — Т. 21. — № 9. — С. 651–656.
4. Саушев А. В. Определение области работоспособности на основе алгоритма непрерывного поиска / А. В. Саушев [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2017. — № 9-3 (63). — С. 68–71. DOI: 10.23670/IRJ.2017.63.087.
5. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.
6. Назаров Д. А. Алгоритм построения гиперпараллелепипедов, вписанных в область работоспособности аналоговых технических систем / Д. А. Назаров // Труды международного симпозиума Надежность и качество. — 2015. — Т. 1. — С. 88–90.
7. Винограденко А. М. Эллипсоидальная адаптация области допусков многопараметрических систем / А. М. Винограденко, А. В. Пасхальный // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2019. — № 1(203). — С. 118–129. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-118-129.
8. Абрамов О. В. Проектирование технических систем с элементами настройки / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. — 2014. — № 2 (6). — С. 51–55.

9. Овсянников А. С. Расчет контрольных допусков на параметры динамического объекта / А. С. Овсянников, М. А. Бурова // Инфокоммуникационные технологии. — 2015. — Т.13. — №3. — С. 345–350. DOI: 10.18469/ikt.2015.13.3.17.
10. Писарев В. И. Техническое обслуживание и ремонт металлообрабатывающих станков с ЧПУ на основе безразборной диагностики технического состояния / В. И. Писарев, В. А. Ваганов, А. Ф. Денисенко, И. О. Тютюрев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2014. — Т.16. — №1-2. — С. 508–514.
11. Миронов А. Н. Исследование вопросов моделирования границ области работоспособности элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов на стадиях создания и эксплуатации / А. Н. Миронов [и др.] // Фундаментальные исследования. — 2015. — №2-13. — С. 2815–2818.
12. Печаткин А. В. Изменение подхода к использованию коррелированных и некоррелированных допусков номиналов электрорадиокомпонентов в поведенческих моделях электронных средств в процессах автоматизированного схемотехнического проектирования / А. В. Печаткин, А. Г. Кизимов, А. Н. Смирнов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. — 2015. — №1(32). — С. 158–165.
13. Назаров Д. А. Подход к анализу параметрической чувствительности систем на основе дискретного представления областей работоспособности / Д. А. Назаров // Информатика и системы управления. — 2017. — №4 (54). — С. 94–104. DOI: 10.22250/isu.2017.54.94-104.
14. Саушев А. В. Методы назначения допусков на параметры технических систем путем линейной аппроксимации граничных точек / А. В. Саушев // Надежность и качество: тр. междунар. симп. — 2015. — Т. 1. — С. 144–147.
15. Широков Н. В. Диагностирование сложных судовых электротехнических устройств с учетом некомпенсированной погрешности / Н. В. Широков // Электрооборудование и автоматизация объектов водного транспорта: сб. науч. тр. — Л.: ЛИВТ, 1985. — С.132–138.
16. Саушев А. В. Алгоритмы синтеза номиналов и допусков многопараметрических систем / А. В. Саушев // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2015. — № 3. — С. 65–73.
17. Saushev A. V. Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary / A. V. Saushev, E. V. Bova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 327. — Is. 5. — Pp. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.
18. 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201.
19. Верфь Бешикташ спустила на воду головной рейдовый перевалочный комплекс Luft 1 // PortNews [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://portnews.ru/news/258414/> (дата обращения: 20.05.2018).
20. Берг М. Вычислительная геометрия. Алгоритмы и приложения / М. Берг [и др.]. — М.: ДМК-Пресс, 2016. — 438 с.

REFERENCES

1. Shirokov, Nikolaj V. “Warning control of ship’s electric power system in case of the power sources failure.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.
2. Saushev, A. V., and N. V. Shirokov. “Diagnosing of the condition of electro - technical systems in space of parameters of their elements.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2 (36) (2016): 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.
3. Katueva, Ya. V., and D. A. Nazarov. “The Methods of Parametric Synthesis Based on Grid Representation of a Region of Acceptability.” *Information Technologies* 21.9 (2015): 651–656.
4. Saushev, A. V., N. V. Shyrokov, V. S. Davydov, and D. A. Sherstnev. “Definition of the field of working capacity on the basis of algorithm of continuous searching of its border points.” *International Research Journal* 9-3(63) (2017): 68–71. DOI: 10.23670/IRJ.2017.63.087.
5. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti jelektrrotehnicheskikh sistem*. SPb.:Politechnica, 2013.
6. Nazarov, D. A. “Alghoritm postroeniya giperparallelepipedov vpisannih v oblast rabotosposobnosti analogov ih tehnicheskikh system.” *Trudi mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost i kachestvo* 1 (2015): 88–90.

7. Vinogradenko, Aleksey Mihaylovich, and Aleksey Vladimirovich Pashal'niy. "Ellipsoidal adaptation of the field of tolerances in multivariable systems." *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* 1(203) (2019): 118–129. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-118-129.
8. Abramov, O. V. "Proektirovanie tehnikeskikh sistem s elementamy nastroyki." *Reliability and quality of complex systems* 2(6) (2014): 51–55.
9. Ovsyannikov, Aleksandr Sergeevich, and Maria AleksandrovnaBurova. "Computing of acceptance tolerance for dynamic object parameters." *Infokommunikacionnye tehnologii* 13.3 (2015): 345–350. DOI: 10.18469/ikt.2015.13.3.17.
10. Pisarev, Vladimir, Anton Vaganov, Alexander Denisenko, and Igor Tyuterev. "Maintenance and repair the metalworking tools with CNC on the basis of CIP diagnostics of the technical condition." *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 16.1-2 (2014): 508–514.
11. Mironov, A. N., E. A. Mironov, O. L. Shestopalova, and S. A. Platonov. "Research of questions modeling of border areas functioning elements of onboard equipment spacecraft at the stage of creation and operation." *Fundamental research* 2-13 (2015): 2815–2818.
12. Pechatkin, A. V., A. G. Kizimov, and A. N. Smirnov. "Izmenenie podhoda k ispolzovaniyu korrelirovannykh i nekorrelirovannykh dopuskov nominalov elektroradiokomponentov v povedencheskikh modelyakh elektronnykh sredstv v protsessakh avtomatizirovannogo shemotehnicheskogo proektirovaniya." *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviat-sionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P. A. Solov'eva* 1(32) (2015): 158–165.
13. Nazarov, D. A. "Approach to system's parametric sensitivity analysis based on the discrete representation of efficiency areas." *Information Science and Control Systems* 4(54) (2017): 94–104. DOI: 10.22250/isu.2017.54/94-104.
14. Saushev, A. V. "Metody naznacheniya dopuskov na parametry tekhnicheskikh sistem putem lineinoi ap-proksimatsii granichnykh tochek." *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* 1 (2015): 144–147.
15. Shirokov, N. V. "Diagnostirovanie slozhnykh sudovykh elektrotekhnicheskikh ustroystv s uchetom ne-kompensirovannoi pogreshnosti." *Elektrooborudovanie i avtomatizatsiya ob'ektov vodnogo transporta: sb. nauch. tr. L.: LIVT, 1985. 132–138.*
16. Saushev, A. V. "Synthesis algorithms of face values and admission of multiple parameter systems." *Information technologies and computing systems* 3 (2015): 65–73.
17. Saushev, A. V., and E. V. Bova. "Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 327. No. 5. IOP Publishing, 2018. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.
18. 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201.
19. "Verf" Beshiktash spustila na vodu golovnoi reidovyi perevalochnyi kompleks Luft 1." *Port News*. Web. 20 May 2018 <<http://portnews.ru/news/258414/>>.
20. Berg, M., O. Cheong, M. Krevel'd, and M. Overmars. *Vychislitel'naya geometriya. Algoritmy i prilozheniya*. M.: DMK-Press, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Широков Николай Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Shirokovn@inbox.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shirokov, Nikolaj V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Shirokovn@inbox.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 25 октября 2019 г.
Received: October 25, 2019.

USING SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE IN THE ELECTRIC NETWORKS OF A SHIP COMPLEX

T. S. Ivanova, V. I. Malarev, B. N. Abramovich

Saint-Petersburg State Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

The application area of ship electric drive is expanding. The engines of boats, barges and motor ships, large and small river and sea vessels need reliable, timely and affordable power supply. The proposed method of braking and reversing the propeller drive with screws allows to store braking energy in the energy storage devices and subsequently use this energy in the electric power systems of high-power vessels of both civilian and navy, containing propeller motors, for which it is necessary to ensure the operation of the electric propulsion system with a high energy efficiency indicator without using the damping blocks of the braking energy of the propeller motors (brake resistors blocks).

The water regime of complex waterworks and lock systems can also be regulated by using superconducting magnetic energy storage (SMES) as an energy source. Based on the analysis of the various types of drives, a method for eliminating short-term interruptions in the power supply of powerful consumers is proposed. The design of the energy storage device and its communication device with the electric network are considered. In this model, a converter with bi-directional valves of the “voltage source” topology based on IGBT transistors is selected, it is economical and has the highest performance, the current can flow in two directions, and the voltage on the source side does not change polarity, which means that the blocking device does not required. To ensure navigation in the cold waters of the Arctic, icebreakers are used, which have electrical transmission to the screws. The case of using SMES while ensuring the installation speed at the time forcing icebreaker speed is discussed in the paper.

This study tests the system of a superconducting coil in the MATLAB/Simulink software environment, presenting it as a direct current source that should respond to a voltage dip in the power grid. To test the system for compensating for the voltage dip in the power supply network, a model of the power part of the network converter and the vector control system is proposed. The results of the work are graphs of computer simulation of processes in the network and inverter, showing the reaction of the coil to the voltage disappearance.

Keywords: Inverter, IGBT-transistors, inductive energy storage, renewable energy sources, automation, pulse-width modulation, phase-locked loop, energy storage, voltage dip.

For citation:

Ivanova, Tatiana S., Vadim I. Malarev, and Boris N. Abramovich. “Using superconducting magnetic energy storage in the electric networks of a ship complex.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 402–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-402-415.

УДК 602.17

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ В ЭНЕРГОСЕТИ СУДОВОГО КОМПЛЕКСА

Т. С. Иванова, В. И. Маларев, Б. Н. Абрамович

Санкт-Петербургский горный университет (СПбГГУ),
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что сфера применения судового электропривода расширяется, поэтому средства водного транспорта по своим важнейшим технико-экономическим и эксплуатационным характеристикам должны обеспечивать ритмичное выполнение плана грузовых и пассажирских перевозок. Подчеркивается, что двигатели катеров и яхт, барж и теплоходов, крупных и небольших речных и морских судов нуждаются в надежном, своевременном и доступном обеспечении мощностью. Рассматриваются накопители энергии, используемые в системах судов большой мощности как гражданского, так и военно-морского флота, содержащие гребные двигатели с гребными винтами. Для таких систем необходимо обеспечить электродвижение с высоким показателем энергетической эффективности без использования блоков гашения

энергии торможения гребных двигателей (блоков тормозных резисторов). Для обеспечения судоходства в холодных водах Арктики используются ледоколы, которые имеют электрическую передачу на винты. В статье рассмотрен случай использования сверхпроводящего индуктивного накопителя (СПИН) при обеспечении установки быстродействием в момент форсирования скорости ледокола.

Предлагается способ устранения кратковременных перебоев в электроснабжении приводов судов, обеспечения торможения и реверса гребного привода с винтами при запасе энергии торможения на накопителе энергии. На основе анализа накопителей различного типа рассмотрена конструкция накопителя и его устройство связи с электрической сетью. В данном исследовании тестируется система сверхпроводящей катушки в программной среде MATLAB / Simulink, представленная в виде источника постоянного тока, установлена работоспособность данной системы при падении напряжения в энергосети. Предложена модель силовой части сетевого преобразователя и векторной системы управления. Результатами работы служат графики компьютерного моделирования процессов в сети и преобразователе, демонстрирующие реакцию катушки на исчезновение напряжения. Источник энергии такого типа целесообразен в системах, где присутствует перераспределение энергии и обмен электромагнитной энергией между узлами в сети.

Ключевые слова: преобразователь, индуктивный накопитель энергии, возобновляемые источники энергии, широтно-импульсная модуляция, фазовая автоподстройка частоты, аккумулирование энергии, провал напряжения, гребной электропривод, реверс.

Для цитирования:

Иванова Т. С. Применение сверхпроводящих индуктивных накопителей в энергосети судового комплекса / Т. С. Иванова, В. И. Маларев, Б. Н. Абрамович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 402–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-402-415.

Введение (Introduction)

В настоящее время в судовой электроэнергетике существует ряд важных проблем, к которым, в частности, относятся:

- несоответствие режима генерации и потребления энергии, оказывающее влияние на устойчивость энергосистем;
- низкая надежность передачи и распределения энергии, приводящая к перерывам в электроснабжении и нарушению непрерывности технологических процессов.

Для решения указанных проблем в течение последнего времени интенсивно ведутся работы в области альтернативных источников энергии, эффективных накопителей энергии, релейной защиты и противоаварийной автоматики для сетей с распределенными источниками. В работах [1], [2] рассмотрены вопросы использования фильтров качества напряжения сети, компенсаторов потерь напряжения, вызванных наличием в распределительной сети мощной нелинейной нагрузки. Разрабатываемые электротехнические устройства способны обеспечивать генерирование дополнительной энергии в часы пиковой нагрузки и накапливать энергию в часы минимального спроса, обеспечивать непрерывность подачи энергии при кратковременных провалах напряжения вследствие аварий на передающих и распределительных линиях, а также решать другие вопросы повышения качества энергии.

Теоретическая часть (Theoretical Part)

Существуют различные способы накопления энергии в кинетической, потенциальной, тепловой и электрической форме с помощью таких накопителей, как маховики, гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), аккумуляторы и конденсаторы (рис. 1). Условно накопители можно разделить на два типа:

1. Быстро реагирующие накопители с малым запасом энергии.
2. Энергоемкие накопители с медленной реакцией.

ГАЭС позволяет аккумулировать большее количество энергии по сравнению с источниками другого типа, но источник энергии подобного типа характеризуется большой инерционностью и при кратковременных нарушениях сети такие источники непригодны. Среди быстродействующих накопителей можно выделить сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии (СПИН),

областью применения которого являются устранение кратковременных перебоев и компенсации быстрых колебаний сети [3].

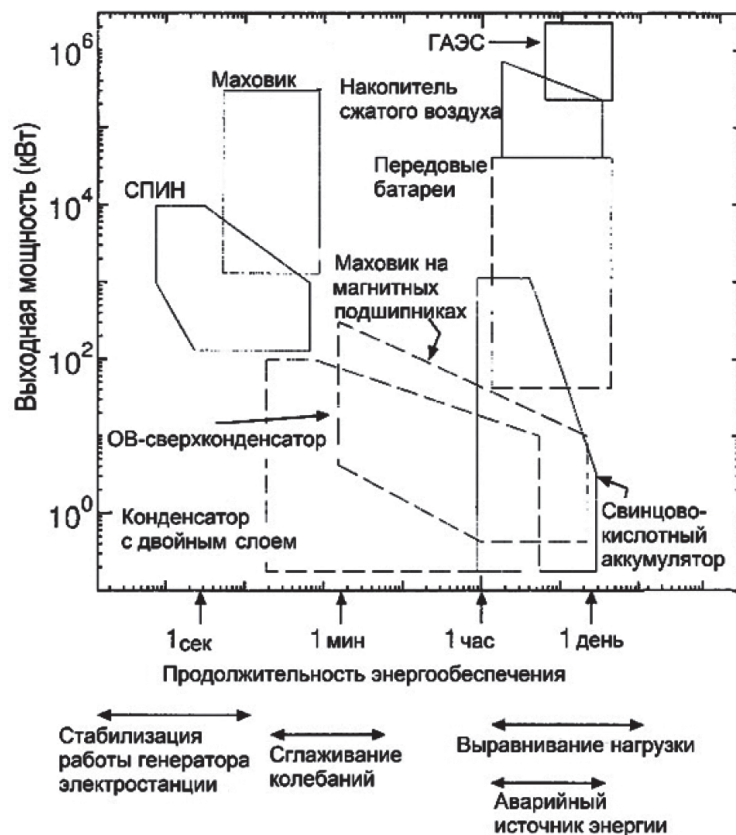


Рис. 1. Диапазон выходной мощности и продолжительности энергообеспечения для накопителей разного типа

СПИН обладает следующими достоинствами:

1. Возможность запасать и доставлять большое количество энергии, ее хранение в течение длительного периода времени с относительно малыми потерями.
2. Короткое время отклика — быстроедействие, достигающее единиц миллисекунд, что позволяет реагировать на самые внезапные аварии в энергосистеме.
3. Отсутствие потерь в процессе преобразования вида энергии. Энергия запасается в электромагнитном виде, иные типы аккумуляторов (например, химические или механические) имеют необходимость в преобразовании типа энергии.
4. Продолжительный технический ресурс.

При понижении температуры до критического состояния сопротивление обмоток СПИН становится относительно малым, при этом ток может протекать бесконечно долго:

$$t = 0; I = I_0 \Rightarrow I = I_0 e^{\frac{-2t}{\tau}}, \tau = L / R; \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{2} LI^2 = W_0 e^{\frac{-2t}{\tau}}, R \rightarrow 0, \tau \rightarrow \infty. \quad (2)$$

Опыт создания таких сильноточных устройств уже имеется на предприятиях «Росатома», построивших в стране десятки крупных сверхпроводящих соленоидов и в настоящее время участвующих в международном проекте по созданию экспериментального термоядерного реактора ITER. К примеру, обмотка тороидального магнитного поля реактора типа «Токамак», созданная из российского сверхпроводника, и энергия, запасаемая в ее магнитном поле, может составлять 600 МДж, или 166 кВт·ч. Это устройство можно назвать *аналогом СПИН*. Кроме того, для реше-

ния задач энергетики зачастую можно обойтись устройствами, меньшими по запасаемой энергии. С помощью СПИН энергоемкостью 40–100 МДж можно повысить динамическую устойчивость энергосистем, работая в системе автоматического регулирования энергосистемы, СПИН будет гасить нежелательные колебания потоков мощности [4].

В современном мире становится популярным вид водного транспорта, оснащенный электродвигателями и Li-ion аккумуляторами. Активно используются электрические паромы, курсирующие на коротких дистанциях. Преимуществом такой трансформации является экономия около 100 тыс. т дизельного топлива в год в мировом использовании и сокращение выбросов на 300 тыс. т CO₂ в год относительно водного транспорта. Электрифицированная установка дает более высокую экономичность на малом и среднем ходу. Примером является паром Ampere, который поступил на службу норвежских транспортных операторов в 2015 г. На нем была установлена батарея 800 кВт·ч весом 11 т, которая питает два электромотора. Аккумулятор полностью заряжается за ночь, а также подзаряжается во время погрузки на причалах, где его ждут дополнительные мощные батареи. При сокращении выбросов CO₂ паромом на 95 % батарея также уменьшает затраты на 85 %. Правительство Норвегии обязало перевозчиков закупать только экологически чистые паромы, гибридные или полностью электрические, что позволит сократить эмиссию токсичных веществ и сэкономить денежные средства на дизельном топливе. Рациональное применение СПИН позволяет получить ряд положительных эффектов, а именно: повысить надежность энергосистем, снизить эксплуатационные затраты на базовых мощностях, уменьшить потери от межсистемных перетоков избыточных мощностей в период минимального значения нагрузки при возможности практически мгновенной смены режима накопления энергии на режим ее выдачи [5].

Особенностью движения паромов является большое количество запусков и разворотов гребного электродвигателя, особенно вблизи берега, сопровождающееся повышенным потреблением энергии в динамических режимах, таких как разгон при отходе и торможение при приближении судна к берегу. Это приводит к увеличению в значительной степени потребления ограниченной емкости батареи и уменьшению ее энергетического ресурса. В работе [6] представлен способ разгона и торможения судна-электрохода, при отходе / подходе его к пирсу с электрическим питанием от береговой сети в начале остановки судна соответственно подают электрическое питание в судовую сеть от береговой. При подходе судна к пирсу останавливают гребной двигатель или снижают частоту его вращения, осуществляя торможение судна с помощью питания, получаемого с берега [7]. Недостатком данного способа является наличие токосъемного устройства, расположенного над судном и контактирующего с береговым токопроводом, который размещают над водной поверхностью.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Объектом исследования в данной работе является преобразователь энергии в системе судового электропривода с накопителем энергии типа СПИН, его применение для обеспечения энергоснабжения в условиях падения напряжения в энергосети, аккумулирование излишней энергии в сети, генерируемой при рекуперации, и использования энергии при разгоне. Электроэнергетическая установка судна содержит тепловые двигатели, электрические генераторы, автоматические выключатели, инверторы напряжения с накопительными элементами (конденсаторами), согласующий электрический преобразователь, накопитель энергии и гребные двигатели, а также систему управления энергетической установкой [8].

В данном исследовании тестируется система СПИН в программной среде MATLAB / Simulink, представляя ее как источник постоянного тока, который должен отреагировать на падение напряжения в энергосети. Такая модель сети может представлять случай торможения судна и реверса винтов. Востребованные мощности накопителей в судостроении — до 10 МВт, а длительность работы — до 5 с. Преимуществом использования накопителя типа СПИН является ускорение процесса торможения судна без применения специального тормозного модуля.

В процессе моделирования проводилось исследование скорости реакции катушки на провал напряжения в сети, работоспособность системы управления инвертором (активным выпрямителем) и структуры преобразователя, осуществлялась проверка способности системы обеспечить нужную мощность нагрузки сети, определялась требуемая плотность заряда катушки постоянно-го тока, а также возможность заряда накопителя через преобразователь.

Использование СПИН на ледоколах. В настоящее время перспективным направлением является разработка месторождений с трудноизвлекаемыми запасами. Арктика — один из наиболее перспективных регионов добычи углеводородов. По прогнозам «Газпром-нефти», к 2030 г. потребность рынка перевозок по Северному морскому пути вырастет на треть, поэтому компания делает ставку на развитие собственного ледокольного и танкерного флотов. Мощность атомных ледоколов превышает мощность дизельных, они сконструированы для обеспечения судоходства в холодных водах Арктики. Одним из преимуществ атомного ледокола служит отсутствие необходимости в частой дозаправке, которая может возникнуть при плавании во льдах, когда такой возможности нет, или дозаправка сильно затруднена. Все атомные ледоколы имеют электрическую передачу на винты. В настоящее время на Балтийском заводе ведется строительство трех ледоколов нового поколения пр. 22220, которые используют инновационную установку «РИТМ-200». Обновленный ледокольный флот обеспечит бесперебойную проводку судов в акватории Северного морского пути.

Движение ледокола во льдах может осуществляться непрерывным ходом, переменными ходами, форсированием льда с разгона. Движение непрерывным ходом с установившейся скоростью возможно, если суммарная тяга гребных винтов достаточна для преодоления ледового сопротивления. Если сила ледового сопротивления превышает максимальную тягу гребных винтов, ледокол может преодолевать лед только с разгона — набегам. В этом случае к электрической передаче на винты можно добавить накопитель энергии типа СПИН. При прокладке канала ледокол форсирует льды, при ударе он резко теряет инерцию, до момента окончательной остановки машинам ледокола необходимо дать полный задний ход. Скорость, которую может развить судно во льду, зависит от мощности его энергетической установки [9].

Источник энергии типа СПИН способен обеспечить быстродействие установки, достигающее единиц миллисекунд, снабжая сеть импульсом энергии, что повышает динамическую устойчивость энергосистемы машин ледокола и позволяет набрать нужную скорость в течение короткого промежутка времени. При плавании в составе каравана во время проводки через льды важным обстоятельством, обеспечивающим успешность продвижения вперед и безопасность плавания, является сохранение минимальной дистанции между судами. Растягивание каравана затрудняет и удлиняет его проводку, так как в этом случае задние суда будут испытывать более частые удары о льдины и вынуждены будут снижать скорость во избежание получения пробоины; в свою очередь, снижение скорости приводит к тому, что суда начинают застревать во льду. Наличие накопителя энергии в составе энергоустановок судов позволит избежать увеличения длины каравана, путем поддержания скорости форсированием в нужный момент времени.

Поскольку источником мощности обычно являются сети переменного тока, необходимо в процессе заряда СПИН произвести выпрямление тока, а в процессе разряда — его инвертирование с помощью преобразователей частоты [10]. Особенность выбранной системы управления преобразователем частоты заключается в регулировании фазы входного тока как в двигательном режиме, так и в режиме генераторного торможения. В предложенной модели выбран преобразователь с двунаправленными вентилями (рис. 2), обладающий наибольшей производительностью, так как при его работе ток может течь в двух направлениях, а напряжение на стороне источника не меняет полярности, что означает отсутствие необходимости в устройстве блокировки.

Заряд энергии СПИН происходит в два этапа: вначале заряжается конденсатор — звено постоянного тока, затем он разряжается на катушку. Использование конденсатора повышает быстро-

действие системы, его размеры обусловлены способностью выдержать напряжение в цепи на постоянном уровне в течение ожидаемых условий эксплуатации.

Уравнения Кирхгофа для модели преобразователя выглядят следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U_{ca} \\ U_{cb} \\ U_{cc} \end{bmatrix} = R_{\phi} \cdot \begin{bmatrix} i_{ua} \\ i_{ub} \\ i_{uc} \end{bmatrix} + L_{\phi} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ua} \\ i_{ub} \\ i_{uc} \end{bmatrix} + R \cdot \begin{bmatrix} U_{ua} \\ U_{ub} \\ U_{uc} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где U_c — фазное напряжение преобразователя на выходе; i_u — фазные токи; U_u — фазные напряжения преобразователя в точке подключения к источнику тока; R_{ϕ} и L_{ϕ} — соответственно сопротивление и индуктивность фильтра на выходе преобразователя.

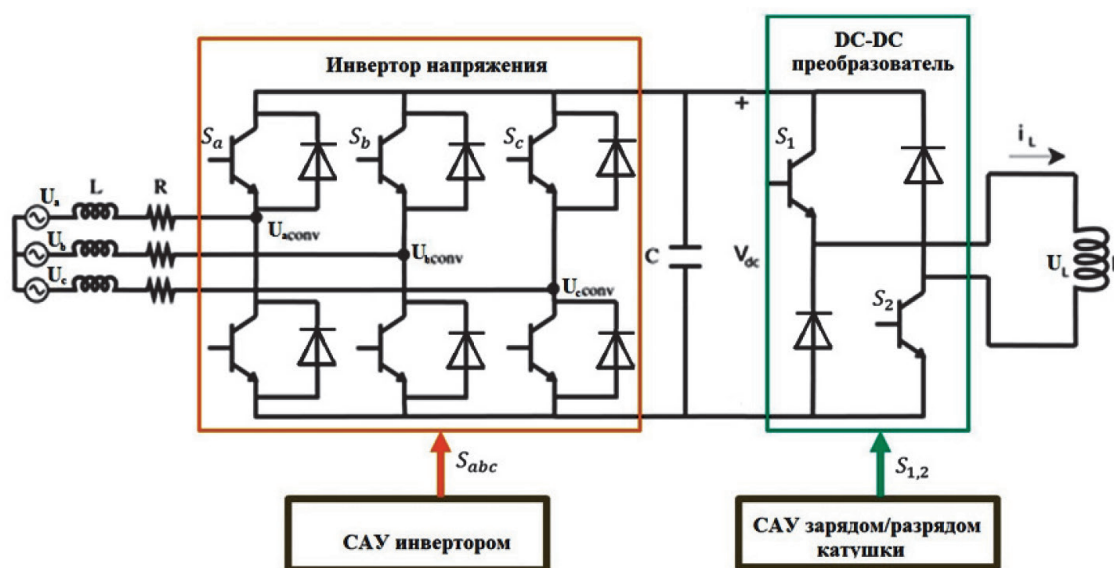


Рис. 2. Силовая схема СПИН

Катушка в цепи является источником постоянного тока, управление которым осуществляется посредством переключения ключей S_1 и S_2 , обеспечивающих различные режимы работы (рис. 3).

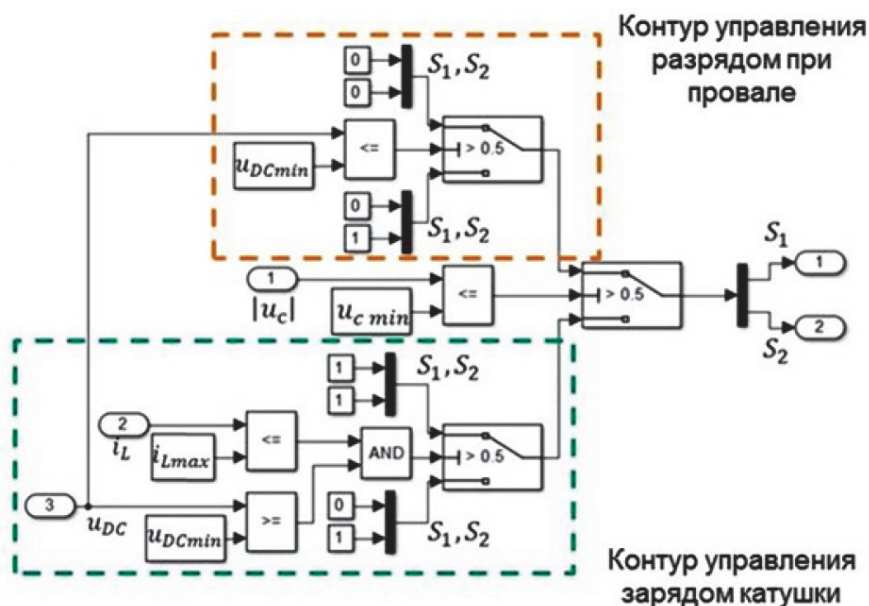


Рис. 3. САУ зарядом/разрядом катушки

1. Положение ключей $\begin{cases} S_1 = 1 \\ S_2 = 1 \end{cases}$. Если напряжение сети на номинальном уровне, то в САУ работает нижний контур управления, при этом $U_{dc} > U_{dcmin}$, а ток катушки $i_L < i_{Lmax}$. Катушка заряжается, ток направлен к ней от конденсатора.

2. Положение ключей $\begin{cases} S_1 = 1 \\ S_2 = 0 \end{cases}$. Когда напряжение сети достигает минимального значения $U_{dc} = U_{dcmin}$ и / или катушка полностью зарядилась, она изолируется от конденсатора, постоянный ток течет в образованном замкнутом контуре.

3. Положение ключей $\begin{cases} S_1 = 0 \\ S_2 = 0 \end{cases}$. При провале напряжения ниже U_{dcmin} в САУ работает верхний контур управления, катушка отдает энергию конденсатору.

САУ инвертором. Инвертор синхронизирует источник энергии и систему энергоснабжения. Система управления посредством сигналов с контроллера регулирует проводимость ключей — отношение времени открытого состояния силового ключа к периоду его работы, далее выбирается алгоритм, зависящий от требуемой формы напряжения на выходе преобразователя:

$$\begin{bmatrix} U_{ua} \\ U_{ub} \\ U_{uc} \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} S_a - S'_a \\ S_b - S'_b \\ S_c - S'_c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где U_u — фазное напряжение преобразователя на его выходе; S и S' — состояния ключей при коммутации для каждой из фаз.

В установке используются мощные полупроводниковые ключи, IGCT — запираемый тиристор с интегрированным блоком управления. Приборы рассчитаны на ток до 6000 А, позволяют наращивать уровень мощности до нескольких сотен мегавольт-ампер. ШИМ управляется векторной системой управления (ВСУ), где происходит преобразование координат к вращающимся осям d и q от неподвижных осей.

Математическая модель системы векторного управления инвертором. Переход к двухфазной системе координат осуществляется с помощью преобразования Парка – Горева:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = x_{dc} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В этом случае уравнения баланса напряжений имеют вид:

$$U_{cd} = L_\phi \frac{di_{ud}}{dt} - \omega_c L_\phi i_{ud} + U_{ud}; \quad U_{cq} = L_\phi \frac{di_{uq}}{dt} - \omega_c L_\phi i_{uq} + U_{uq}. \quad (6)$$

Задается такой вектор напряжения инвертора U_u , при котором реактивная и активная мощности на выходе системы соответствуют показаниям сети по заданному вектору U_c (рис. 4):

$$P_c = \frac{3}{2} i_{ud} \cdot u_{cd}; \quad Q_c = \frac{3}{2} i_{uq} \cdot u_{cq}. \quad (7)$$

Блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) генерирует сигнал, пропорциональный частоте сети. Сигнал поступает на ПИ-регулятор, на котором происходит преобразование Парка — математическое представление мощности трехфазной сети в двух составляющих вектора выходного напряжения, его действительной и мнимой части, для раздельного регулирования:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где θ — угол поворота системы координат.

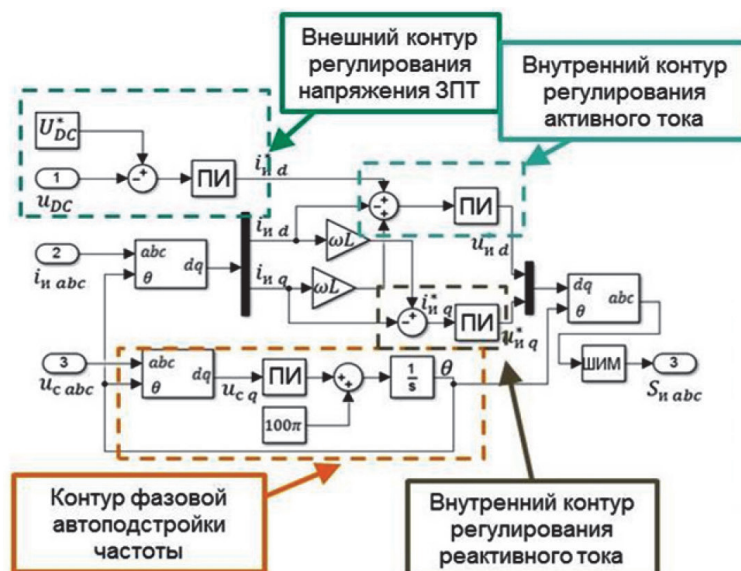


Рис. 4. Векторная САУ инвертором

После преобразования система координат синхронизируется с вектором напряжения сети: действительная часть выходного напряжения инвертора должна совпадать с направлением вектора сети, а мнимая должна быть равна нулю. При этом ток инвертора и напряжение сети должны совпадать по фазе. Два компонента контролируются независимо. Синхронизация вектора достигается ПИ-регулятором контура ФАПЧ согласно использованию следующего закона:

$$\theta = \int k_{PI}(-U_{cq}); \quad k_{PI} = k_P(x^* - x) + k_I(x^* - x). \quad (9)$$

Регулирование происходит по двум контурам: внешнему и внутреннему. Внешний контур регулирует активный и реактивный токи для поддержания номинального значения напряжения и реактивной мощности соответственно, а внутренний рассчитывает значение напряжения на блок ШИМ с минимальной ошибкой. Как отмечалось ранее, реактивная составляющая мощности должна стремиться к нулю по результатам синхронизации. Система координат для преобразований значений в блоке ШИМ показана на рис. 5.

Задание внешним контуром по току:

$$i_{\phi d}^* = k_{PI}(U_{dc}^* - U_{dc}); \quad i_{\phi q}^* = k_{PI}(Q_c^* - q_c); \quad (10)$$

$$x_{dq0} = K_s x_{abc} \theta = \int k_{PI}(-U_{cq}); \quad (11)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \theta = \int k_{PI}(-U_{cq});$$

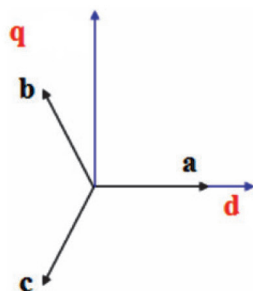


Рис. 5. Фазные преобразования
dq и abc систем координат

Напряжения во внутреннем контур для блока ШИМ определяется из формулы

$$U_d^* = U_{cd} + k_{PI}(i_{fd}^* - i_{ud}) - \omega_c L_{\phi} i_{uq} \theta = \int k_{PI}(-U_{cq}); \quad (12)$$

Далее вычисляются действительная и мнимая части напряжения инвертора. ПИ-регулятор производит обратное преобразование Парка двух составляющих мощности для трехфазной сети, формируя трехфазный синусоидальный сигнал, который поступает на блок ШИМ. На последнем блоке формируются импульсы на IGBT-транзисторы. Сигналы для комбинаций ключей аппроксимируют вектор напряжения на выходе инвертора, он может принимать семь положений: шесть активных и одно нулевое. Таким образом, в небольшом периоде генерируется среднее значение по таблице времени включения каждого сектора (комбинации ключей) [11]. При выборе СУ проводился анализ работ, посвященных методам ШИМ. В работе [12] показано, что метод с векторной ШИМ полностью идентичен методу классической ШИМ с определенной функцией предмодуляции. Оба подхода дают один и тот же результат. Кроме того, отмечается, что использование функции предмодуляции специального вида проще векторного метода. С учетом ранее изложенного, допускается использование метода классической ШИМ с функцией предмодуляции.

Результаты эксперимента (Experiment Results)

Для проверки метода построена модель (рис. 6) в программной среде MATLAB / Simulink, с помощью которой требуется получить графики, демонстрирующие реакцию катушки на провал напряжения в сети, торможение и реверс гребного привода, а именно: изменение напряжений в энергосети и на катушке, изменение активной мощности, потребляемой нагрузкой и генерируемой СПИН, а также изменение тока в катушке. При провале напряжения в узле 1, для того, чтобы в узле 3 нагрузка оставалась в номинальном режиме, автоматические выключатели отсоединяют цепь слева от них и замыкают нагрузку на систему СПИН, которая начинает генерировать мощность. При возобновлении напряжения в узле 1, выключатели соединяют узел 3 с сетью. Нагрузка получает мощность от сети, а СПИН аккумулирует магнитную энергию.

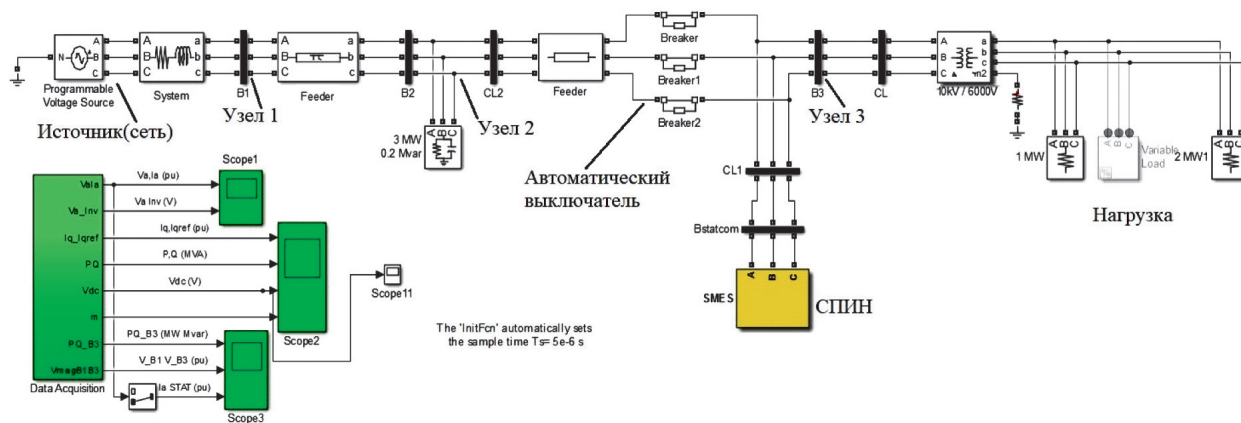


Рис. 6. Модель в системе MATLAB / Simulink

На первом графике изменения напряжения (рис. 7) видно: при заряженной до номинального значения СПИН в момент времени $t_1 = 0,2$ с происходит провал напряжения до 20 % от номинального. К сети подключается система СПИН, которая переходит в режим питания нагрузок сети. График мощности (рис. 8) показывает, как в узле 2 мощность падает из-за отключения участка от сети, а на катушке мощность становится отрицательной, так как она работает в режиме генерации. Видно, что мощности катушки, заряженной на 9 кА, не хватает для покрытия провала, в момент времени 0,22 энергия на ней заканчивается и уровень напряжения понижается.

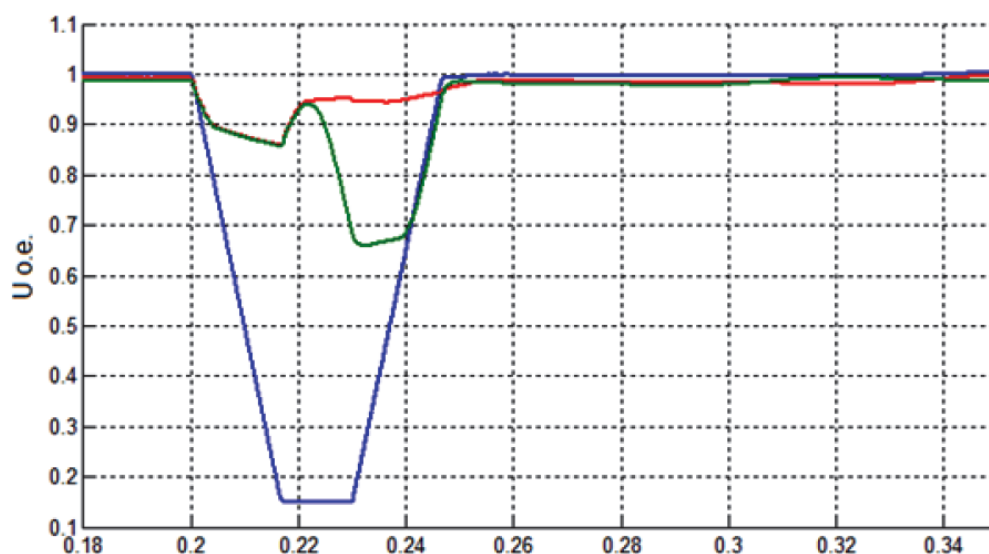


Рис. 7. Графики зависимостей напряжения от времени

Условные обозначения:

- в узле 1
- в узле 3 при СПИН, рассчитанной на 9 кА
- в узле 3 при СПИН, рассчитанной на 11 кА

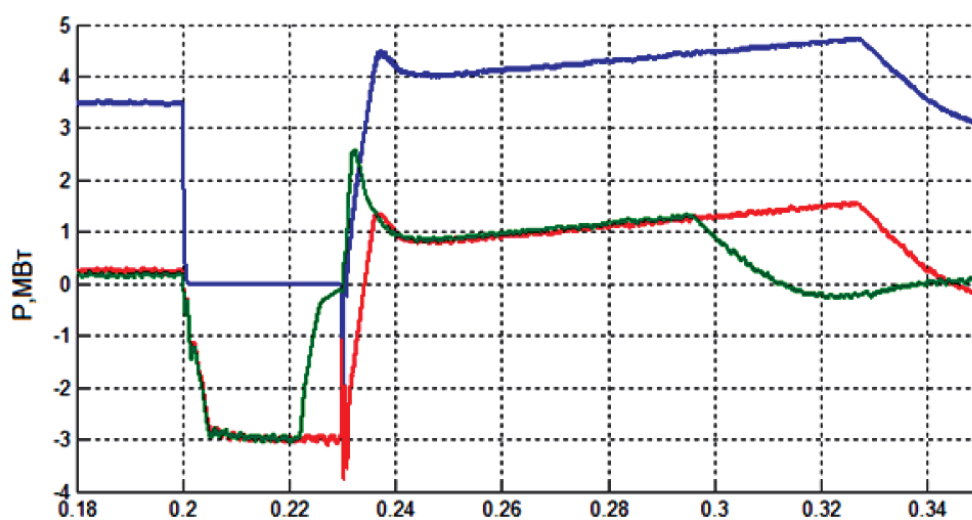


Рис. 8. Графики зависимостей активной мощности от времени

Условные обозначения:

- на входе узла 3 при СПИН, рассчитанной на 11 кА
- на выходе СПИН, рассчитанной на 9 кА
- на выходе СПИН, рассчитанной на 11 кА

На графиках рис. 9 показано как катушка на 11 кА справляется со своей задачей и генерирует мощность, требуемую нагрузке. Через 30 мс после провала напряжения на нагрузке восстанавливается до номинального уровня, а катушка заряжается от сети.

Графики на рис. 10 показывают изменение тока катушек со временем, более мощная катушка разряжается на нагрузку не до конца, напряжение на конденсаторе стабилизируется, а после катушка вновь аккумулирует энергию, подключаясь к сети с помощью автоматических выключателей.

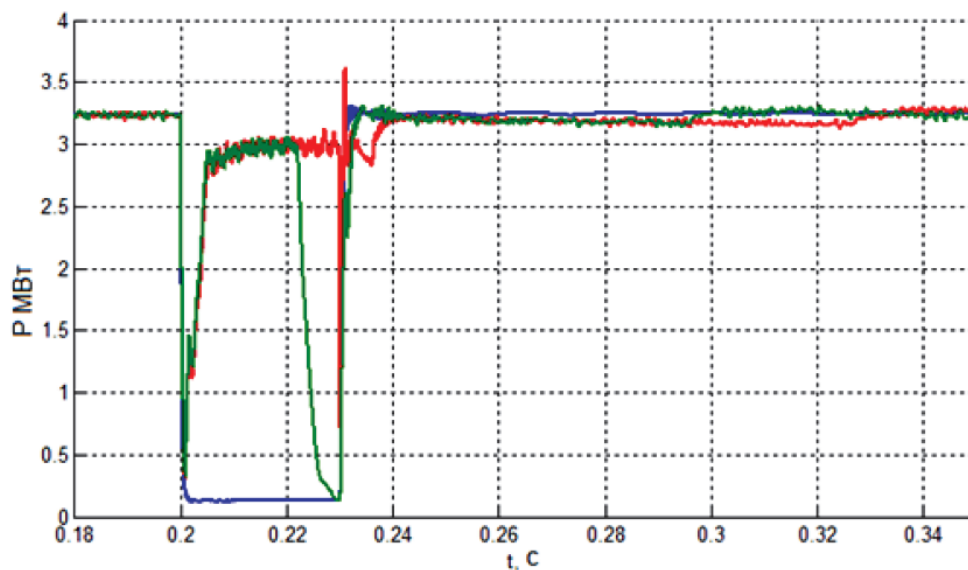


Рис. 9. Графики зависимостей активной мощности от времени

Условные обозначения:

- — потребляемой нагрузкой без СПИН;
- — потребляемой нагрузкой при СПИН, рассчитанной на 9 кА
- — потребляемой нагрузкой при СПИН, рассчитанной на 11 кА

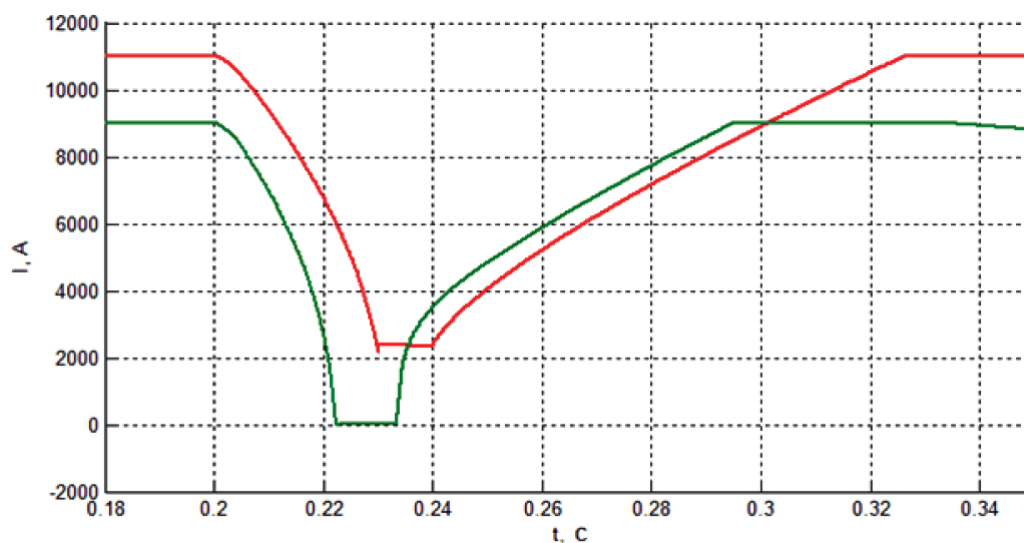


Рис. 10. График зависимости тока катушки от времени

Условные обозначения:

- — СПИН, рассчитанной на 9 кА
- — СПИН, рассчитанной на 11 кА

Таким образом, на основе анализа накопителей различного типа показано, что использование СПИН является одним из возможных способов устранения кратковременных перебоев в электроснабжении потребителей. Рассмотрена конструкция накопителя и его устройство связи с электрической сетью.

Для тестирования системы компенсации провала напряжения в энергосети предложена модель силовой части сетевого преобразователя и его векторной системы управления в среде MATLAB / Simulink. Получены графики компьютерного моделирования процессов в сети и пре-

образователе, демонстрирующие реакцию катушки на исчезновение напряжения и способность СУ обеспечить процесс аккумулирования энергии.

Выводы (Summary)

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная система СПИН (SMES) способна обеспечить нагрузку необходимой активной мощностью 3 МВт в течение 30 мс.

2. Компьютерное моделирование показало работоспособность СУ сетевым преобразователем при кратковременном провале напряжения в сети быстрым действием системы 30 мс, а также эффективность заряда катушки при превышении уровня напряжения на звене постоянного тока преобразователя частоты выше определенного уровня. Такая модель сети может представлять случай торможения судна и реверса винтов. При торможении судна без накопительного элемента рассеивается до 20 % энергии. Для перераспределения тормозной энергии перспективным направлением является применение СПИН в электроэнергетической системе на базе сети постоянного тока.

3. Использование накопителя энергии также позволит уменьшить установленную мощность первичных тепловых источников энергии. Энергия в накопителе будет расходоваться на покрытие динамики при пуске привода либо при необходимости его разгона до более высокой скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муньос-Гихоса Х. М. Применение активного выпрямителя в качестве компенсатора токов искажений в распределительных сетях 6–10 кВ / Х. М. Муньос-Гихоса, С. Б. Крыльцов, С. В. Соловьев // Записки Горного института. — 2019. — Т. 236. — С. 229–238. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.229.

2. Shonin O. B. A fast digital algorithm for identifying the type of asymmetrical faults occurred in a three-phase network / O. B. Shonin, S. B. Kryltcov // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). — IEEE, 2017. — Pp. 1016–1021. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910729.

3. Костин В. Н. Компьютерное моделирование режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой / В. Н. Костин, В. А. Сериков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. — 2019. — Т. 25. — № 1. — С. 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102.

4. Жуковский Ю. Л. Классификация инструментов инвестиционной поддержки технологий интегрированных энергетических систем / Ю. Л. Жуковский, А. Д. Булдыско, А. А. Халтурин, А. М. Блинов, М. Н. Крук, А. С. Семенов // Российский экономический интернет-журнал. — 2019. — № 3. — С. 29–30.

5. Костин В. Н. Моделирование несинусоидальных режимов работы систем электроснабжения / В. Н. Костин, А. В. Кривенко, В. А. Сериков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2019. — № 7. — С. 394–405.

6. Алексеев Г. М. Особые случаи морской практики / Г. М. Алексеев. — М.: Морской транспорт, 1959. — 339 с.

7. Иванова Т. С. Обеспечение устойчивой работы частотно-регулируемого привода шахтной подъемной установки при провалах напряжения / Т. С. Иванова, О. Б. Шонин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2017. — № 6. — С. 53–67.

8. Пат. 2328408 Российская Федерация, МПК В63Н 21/17, В63В 38/00. Способ разгона и торможения судна-электрохода при отходе-подходе его к пирсу с электрическим питанием от береговой сети / В. Ф. Веревкин, К. А. Реков; заяв. и патентообл. Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского. — № 2006145749/11; заявл. 21.12.2006; опубл. 10.07.2008, Бюл. № 19.

9. Kostin V. N. Higher harmonics and limiting thereof in power supply systems of different voltages / V. N. Kostin, V. A. Serikov, I. A. Sherstennikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 378. — Is. 1. — Pp. 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012051.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616323. Имитационная модель электрической сети с частотно-регулируемым электроприводом (ЧРП), звеном источника бесперебойного питания (ИБП) и активным выпрямителем (АВ) / Т. С. Иванова; заяв. и патентообл. Санкт-Петербургский горный университет. — № 2018613466; заявл. 09.04.2018; опубл. 29.05.2018.

11. Ivanova T. S. Development of a power transformer residual life diagnostic system based on fuzzy logic methods / T. S. Ivanova, V. I. Malarev, A. V. Kopteva, V. Yu. Koptev // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 1353. — Is. 1. — Pp. 012099. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012099.

12. Белоусов И. В. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко, Л. М. Бровцинова // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

REFERENCES

1. Munoz-Guijosa, Juan Manuel, Sergei B. Kryltcov, and Sergei V. Solovev. “Application of an Active Rectifier used to mitigate currents distortion in 6-10 kV distribution grids.” *Journal of Mining Institute* 236 (2019): 229–238. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.229.

2. Shonin, Oleg B., and Sergei B. Kryltcov. “A fast digital algorithm for identifying the type of asymmetrical faults occurred in a three-phase network.” *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. IEEE, 2017. 1016–1021. DOI: 10.1109/EIconRus.2017.7910729.

3. Kostin, V. N., and V. A. Serikov. “Computer simulation of operating power supply modes with non linear load.” *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology* 25.1 (2019): 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102.

4. Zhukovskii, Yu. L., A. D. Buldysko, A. A. Khaltu-rin, A. M. Blinov, M. N. Kruk, and A.S. Semenov. “Klassifikatsiya instrumentov investitsionnoi podderzhki tekhnologii integrirovannykh energeticheskikh system.” *Rossiiskii ekonomicheskii internet-zhurnal* 3 (2019): 29–30.

5. Kostin, Vladimir Nikolaevich, Aleksandr Vladimirovich Krivenko, and Vladimir Aleksandrovich Serikov. “Simulation of nonusinusoidal operating modes power supply systems.” *News of the Tula state university. Technical sciences* 7 (2019): 394–405.

6. Alekseev, G.M. *Osobyie sluchai morskoi praktiki*. M.: Morskoi transport, 1959.

7. Ivanova, Tatiana Serqeevna, and Oleg Borisovich Shonin. “Providing the sustainable working of frequency controlled drive of mine lifting installation at blackout.” *News of the Tula state university. Technical sciences* 6 (2017): 53–67.

8. Verevkin, V. F., and K. A. Rekov. RU 2 328 408 C1, IPC B63H 21/17, B63B 38/00. Sposob razgona i tormozheniya sudna-elektrokhoda pri otkhode-podkhode ego k pirsu s elektricheskimi pitaniem ot beregovoi seti. Russian Federation, assignee. Publ. 10 July 2008.

9. Kostin, V. N., V. A. Serikov, and I. A. Sherstennikova. “Higher harmonics and limiting thereof in power supply systems of different voltages.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 378. No. 1. IOP Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012051.

10. Ivanova, T. S. Certificate of state registration of a computer program № 2018616323. Imitatsionnaya model' elektricheskoi seti s chastotno-reguliruемым электроприводом (ChRP), zvenom istochnika bespereboynogo pitaniya (IBP) i aktivnym vypryamitelem (AV). Russian Federation, assignee. Publ. 29 May 2018.

11. Ivanova, T. S., V. I. Malarev, A. V. Kopteva, and V.Yu. Koptev. “Development of a power transformer residual life diagnostic system based on fuzzy logic methods.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1353. No. 1. IOP Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012099.

12. Belousov, Igor V., Veniamin F. Samosejko, and Ludmila M. Brovtsinova. “Comparative analysis of the pulse width modulation methods.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванова Татьяна Сергеевна —
аспирант
Научный руководитель: Абрамович Борис
Николаевич
Санкт-Петербургский горный
университет (СПбГТУ)
199106, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
21-я линия В. О., 2
e-mail: Ragnhice@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanova, Tatiana S. —
Postgraduate
Supervisor:
Abramovich, Boris N.
Saint-Petersburg State Mining
University
2 21-ya liniya Vasil'yevskogo Ostrova Str.,
St. Petersburg, 199106, Russian Federation
e-mail: Ragnhice@list.ru

Маларев Вадим Игоревич —

кандидат технических наук, доцент

Санкт-Петербургский горный

университет (СПбГГУ)

199106, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

21-я линия В. О., 2

e-mail: vgdoll@yandex.ru

Абрамович Борис Николаевич —

доктор технических наук, профессор

Санкт-Петербургский горный

университет (СПбГГУ)

199106, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

21-я линия В.О., 2

e-mail: babramov@mail.ru

Malarev, Vadim I. —

PhD, associate professor

Saint-Petersburg State Mining

University

2 21-ya liniya Vasil'yevskogo Ostrova Str.,

St. Petersburg, 199106, Russian Federation

e-mail: vgdoll@yandex.ru

Abramovich, Boris N. —

Dr. of Technical Sciences, professor

Saint-Petersburg State Mining

University

2 21-ya liniya Vasil'yevskogo Ostrova Str.,

St. Petersburg, 199106, Russian Federation

e-mail: babramov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2019 г.

Received: November 27, 2019.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 12. № 2

2020 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.04.20. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 25,25. Тираж 500 экз. Заказ № 140/20

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7