

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011  
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010  
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001  
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110  
11010110000101011110100101001101101010110001011010101101001010011101010101101001101001  
10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011  
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010  
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001  
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110  
11010110000101011110100101001101101010110001011010001100001010011101010001101001101001

№ 3 (37) том 3 2017



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010  
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001  
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110  
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001  
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010  
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 (37) Т. 3 2017 www.morintex.ru, ISSN № 2073-7173,

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

## Главный редактор:

**Н.В. Никитин, д.т.н., профессор**

## Редакционный Совет

### Сопредседатели

И.Г.Захаров, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора ЦМКБ «Алмаз»

Г.А. Туричин, д.т.н., Ректор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

### Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, генеральный директор, НИЦ "МОРИНТЕХ"

Г.Н. Муру, к.т.н., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта

Огай С. А. к.т.н., доцент ректор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия

И.Г. Малыгин, д.т.н., профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, референт генерального директора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

С.П. Столяров, д.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и автоматизации, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

## Редакционная коллегия

### Заместители главного редактора

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

П.А. Шауб, д.т.н., профессор, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ

### Члены Редколлегии

А.В. Алексеев, д.т.н., профессор Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

А.Е. Богданов к.т.н. — ОАО «Системы управления»

Р.В. Борисов д.т.н. профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Ю.А. Власов, к.ф.-м.н. преподаватель, Флоридский Международный Университет, Майами, США

Войлошников М.В., д.т.н., профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

А.Н. Дядик, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация

Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

В.В. Родионов, к.т.н, с.н.с., ЗАО «Си Проект»

В.Ю. Семенова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский морской государственный университет

Н.А. Тарануха, д.т.н., профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

**Периодичность издания** — 4 номера в год

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://vak.ed.gov.ru>

**Журнал включен в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук и в международную реферативную базу данных Web of Science**

Рукописи представляются в редакцию в электронном виде (на диске или по электронной почте: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru))

**Учредитель - издатель:** Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

**Свидетельства о регистрации СМИ** ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-3345 от 19.09.2008

Редакция в обязательном порядке осуществляет экспертную оценку всех материалов, публикуемых в журнале

**190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3**

**Телефон/факс +7 (812) 513-04-51**

**e-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru)**

Ответственность за содержание информационных и рекламных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы и рекламодатели.

**Перепечатка допускается только с разрешения редакции**

Мнение редакционного совета и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций **Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

Редакционная деятельность научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» опирается, в частности, на рекомендации Комитета по этике научных публикаций, а также на ценный опыт авторитетных международных журналов и издательств.

<http://morintex.ru/ru/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

**Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»**

Дизайн: А.В. Антонов



# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 3 (37) V. 3 2017 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru) ISSN 2073-7173,

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

## Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

## Editorial Board

### Co-chairmen

I.G. Zakharov, Doctor of Engineering, Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz"

G.A. Turichin, Doctor of Engineering, Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University

## Council Members

E.M. Appolonov, Doctor of Engineering, Chief Researcher Krylov State Research Centre

A.I. Gajkovich, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Malygin I.G, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

G.N. Muru, PhD, CEO, 51 CCIS

Ogai S.A., PhD, Associate professor, Rector, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Doctor of Engineering, Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre

K.V. Rozhdestvenskij, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University

S.P. Stoljarov, Doctor of Engineering, Professor, Dean of the Faculty of naval power and automation, Saint-Petersburg State Marine Technical University

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

I. Gaykovich, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

A. I. Frumen, PhD, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

P. A. Shaub, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy

### Members of Editorial Staff

A.V. Alekseev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

A. E. Bogdanov, PhD, JSC "Control Systems"

R. V Borisov, Doctor of Engineering, Professor St. Petersburg State Marine Technical University

Yu. A. Vlasov, PhD, Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

Voyloshnikov M.V., Doctor of Engineering, Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

A.N. Dyadik, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

V. A. Evteev, Doctor of Engineering, United Shipbuilding Corporation

Yu. I. Nechayev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

V. V. Rodionov, PhD, Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project"

V. Yu.Semenova, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

N. A Taranukha, Doctor of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

## Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index <http://vak.ed.gov.ru>

**The magazine is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published and in the international abstract Web of Science database.**

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (on CD or via E-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru))

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

**Registration Certificate:** ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008,

Эл № ФС72-3345

**Address:** Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg

120121, Russian Federation

Phone/fax +7 (812) 513-04-51

e-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru)

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results <http://vak.ed.gov.ru>

Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Authors and advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

Opinion of editorial staff and editorial board may not coincide with those of the authors of publications

## Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.

<http://morintex.ru/en/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Design: A.V. Antonov



# 51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

Санкт-Петербург  
190000, Английская наб., д. 38  
Тел./факс: (812) 315 4945

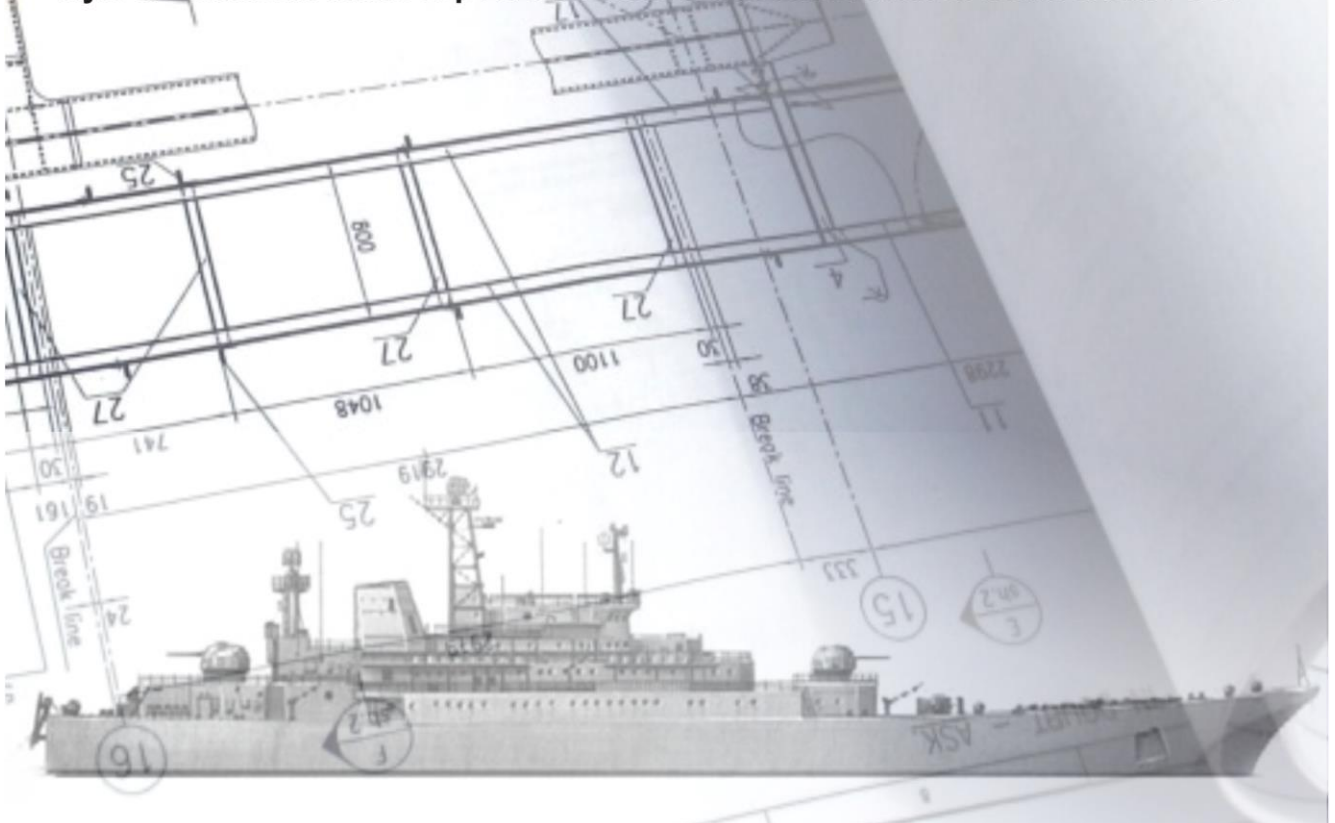
Санкт-Петербург, Ломоносов  
198412, ул. Михайловская, д. 14  
Тел./факс: (812) 423 1600

Выполнение функций проектанта по более чем 120 проектам кораблей и судов ВМФ иностранной постройки.

Разработка технической документации для обеспечения модернизации, ремонта и сервисного обслуживания кораблей и судов ВМФ.

Разработка документов по стандартизации (ГОСТ РВ, ОСТВ и др.).

Сбор и хранение копий технических условий на продукцию, разработанную по заказам Минобороны России и поставка их исполнителям ГОЗ.



## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
<b>КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ</b>	
<b>И.В. Алешин, В.К. Гончаров, Е.С. Зуева, А.С. Портной</b> Безопасность морских технологий: обеспечение безопасности при эксплуатации морских нефтегазовых комплексов .....	8
<b>ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>А.Ш. Готман, А.А. Девяткин, М. А. Титов</b> Краткая история водомётных движителей судов .....	17
<b>Д.А. Пономарев</b> Современные методы решения задачи взаимодействия конструкций с водо-воздушной средой .....	30
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ</b>	
<b>Г.Б. Крыжевич</b> Концептуальные решения для ледостойких плавучих буровых установок, обеспечивающие круглогодичную эксплуатацию в Арктике .....	41
<b>А.Л. Стариченков, Д.А. Скороходов, С.Н. Турусов</b> Метод оценки конструктивной безопасности судов на подводных крыльях .....	48
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)</b>	
<b>А.Г. Даниловский, И.В. Атанасов, П. П. Аунг</b> Типоразмерный ряд двухступенчатых утилизационных котлов .....	54
<b>А.Е. Салиенко</b> Алгоритм определения собственных частот и форм колебаний погруженных в воду рабочих колес гидротурбин на основе информации о параметрах собственных колебаний рабочего колеса в воздухе .....	60
<b>УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ</b>	
<b>А.В. Макшанов</b> Решение плохо обусловленной задачи траекторного оценивания на основе полисценарного подхода .....	65
<b>С. М. Евсеенко</b> О степени централизации и децентрализации управления организационно-техническими процессами .....	70
<b>АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ</b>	
<b>И.В. Баранец, А.В. Краснов, Ф.Ф. Легуша, С.И. Пугачев, Е.Ю. Рытов, И.М. Старобинец, М.М. Шаланова</b> Отверждение эпоксидного клея в СВЧ-электромагнитном поле .....	82
<b>УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ</b>	
<b>М. Л. Маринов, Д.А. Скороходов С.Н. Турусов</b> Человеческий фактор – как решать проблему? (на английском языке) .....	89
<b>К.Г. Тюленев</b> Принятие решений по системному управлению инфраструктурой контейнерных перевозок .....	97
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b>	
<b>С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов, О.Ю. Лукомская, М.А. Асаул</b> Разработка имитационной модели управления прохождением судов через систему судопропуска Волго-Донского судоходного канала .....	105

## CONTENTS

CTP.

### **SHIP BUILDING**

- I. Aleshin, V. Goncharov, E. Zueva, A. Portnoy** Safety of marine technologies: safety of offshore oil and gas operations ..... 8

### **THEORY OF SHIP AND STRUCTURES**

- A. Gotman, A. Devjatkin, M. Titov** Short history of water jet propulsion of ships ..... 17
- D. Ponomarev** Modern methods for solving the problem of interaction of structures with water-air medium ..... 30

### **SHIP DESIGNING AND STRUCTURE**

- G. Kryzhevich** Conceptual solutions of the ice resistant floating drilling units for year-round operation in the Arctic ..... 41
- A. Starichenkov, D. Skorokhodov, S. Turusov** A method for the assessment of structural safety hydro-foils ..... 48

### **SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY).**

- A. Danilovsky, I. Atanasov, P. Aung** Size-range of two-step recycling boilers ..... 54
- A. Salienko** Algorithm for determining natural frequencies and modes of runner of hydraulic turbines in water based on information on frequencies and modes of runner in the air ..... 60

### **CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION**

- A. Makshanov** Solution of ill conditioned trajectory estimation task based on polyscenario approach ..... 65
- S. Evseenko** Revisiting the degree of the centralization and decentralization and technological processes management ..... 70

### **AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS**

- I. Baranets, A. Krasnov, F. Legusha, S. Pugachev, E. Rytov, I. Starobinets, M. Shalanova** Microwave hardening of the epoxy adhesive ..... 82

### **CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS**

- M. Lubenov., D. Skorokhodov, S. Turusov** The human factor - how to solve the problem? ..... 89
- K. Tyulenev** Decision making in system management infrastructure for container traffic ..... 97

### **FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING**

- S. Seliverstov, Y. Seliverstov, O. Lukomskaya, M. Asaul** Development of the simulation of management of the lock control system Volga-Don channel ..... 105

## О ЖУРНАЛЕ

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления.

**Журнал включен в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.**

**Наш журнал включен в международную реферативную базу данных Web of Science**

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 года и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2015 года и с № 4(30) 2015 полные выпуски размещены в научной электронной библиотеке.

**Подписной индекс 99366 в «Межрегиональном агентстве подписки» (МАП).**

Журнал распространяется посредством подписки в МАП и в редакции, а также на выставках, конференциях и симпозиумах.

### Тематика

Тематика журнала соответствует следующим специальностям научных работников номенклатуры ВАК: кораблестроение (теория корабля и строительная механика, проектирование и конструкция судов, технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства, судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные), физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие); информатика, вычислительная техника и управление (системный анализ, управление и обработка информации, автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, управление в социальных и экономических системах, математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, системы автоматизации проектирования, теоретические основы информатики, математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

### Основные направления

- Интеллектуальные технологии в проектировании кораблей и судов, компьютеризация процессов проектирования (управление и организация проектирования, системы автоматизированного проектирования). Морская история и техника.
- Интеллектуальные технологии в строительстве и ремонте кораблей и судов (перспективные технологии в строительстве и ремонте судов, автоматизированные системы подготовки производства, использование роботов).
- Интеллектуальные технологии в эксплуатации кораблей и судов (системы автоматизации кораблей и судов, автоматизированные системы управления, проблемы судовой эргономики, экология).
- Интеллектуальные технологии в прикладных исследованиях (математическое моделирование и компьютерный эксперимент, строительная механика, гидроаэродинамика, термодинамика, физические поля корабля).
- Интеллектуальные технологии в морской и судовой энергетике. Энергосберегающие технологии.
- Интеллектуальные технологии морского приборостроения.
- Искусственный интеллект в морских технологиях.
- Интеллектуальные технологии в маркетинговых исследованиях.
- Экономика и финансы в судостроении
- Кораблестроительное образование

## ABOUT JOURNAL

New scientific developments, new research results, new methods, procedures and technologies in the area of ship building, information science, computer engineering and control are published in the magazine.

**The magazine is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published.**

**Our log is included in the international abstract Web of Science database.**

**In the magazine the articles shall be reviewed by leading specialists in the field of the article.**

The magazine is intended for a wide range of scientists and specialists, as well as heads of scientific research and design organizations, industry, educational institutions, navy, as well as teachers, postgraduate students and students of higher educational institutions.

**Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.**

The magazine is circulated in Russia and abroad by subscription in Interregional Subscription Agency and in editorial office, as well as in exhibitions, conferences and symposiums.

**BY the organizations' request the magazine editorial office can send any magazine issue or the whole set of magazines in general.**

The magazine subject corresponds to the following specialities of scientific workers according to the list of Supreme Attestation Commission: Ship Building, Theory of Ship and Structures, Ship Designing and Structure, Technology of Ship Building, Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production, Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary), Physical Fields of Ship, Ocean, Atmosphere and Their Interaction); Information Science, Computer Engineering and Control System Analysis, Control and Processing of Information, Automation and Control of Processes and Productions, Control in Social and Economic Systems, Software for Computers, Complexes and Computer Networks, Designing Automation Systems, Foundations of Information Science Mathematical Modelling, Numerical Procedures and Software Systems).

### Basic Magazine Trends

- Intelligent technologies for designing of ships and vessels, computing of design process (control and organization of designing, automated designing systems). Marine History and Equipment.
- Intelligent technologies for ship and vessel building (advanced technologies for ship building, automated systems of production preparation, robot using).
- Intelligent technologies for ship and vessel operation (ship and vessel automation systems, automated control systems, problems in ergonomics, ecology).
- Intelligent technologies in applied researches (mathematical modelling and computer experiment, theory of structures, aerohydrodynamics, thermodynamics, physical fields of ship).
- Intelligent technologies in marine and ship power engineering. Energy-saving technologies.
- Intelligent technologies of marine instrument engineering.
- Artificial intelligence in marine technologies.
- Intelligent technologies in marketing researches • Intelligent technologies in logistics



**КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

УДК 629.12.001.2

**БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ:  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОРСКИХ  
НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПЛЕКСОВ****Игорь Владимирович Алешин**

доктор технических наук, профессор,  
профессор Кафедры океанотехники и морских технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: aleshin-igor@mail.ru

**Вадим Константинович Гончаров**

доктор технических наук, профессор,  
профессор Кафедры океанотехники и морских технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: vkgonch@mail.ru

**Екатерина Сергеевна Зуева**

аспирант Кафедры океанотехники и морских технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: zueva\_ekaterina\_smtu@mail.ru

**Алексей Семёнович Портной**

доцент, кандидат технических наук,  
профессор Кафедры океанотехники и морских технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: port\_ocean@mail.ru

**Аннотация**

В работе приведены результаты анализа современных проблем обеспечения безопасности эксплуатации морских нефтегазовых комплексов в арктических регионах. Выполнен анализ и классификация опасностей, связанных с освоением морских нефтегазовых месторождений. Внесены необходимые уточнения в определения терминов «авария» и «аварийная ситуация». Путём статистического анализа показано, что более половины аварий при эксплуатации морских нефтегазовых комплексов в настоящее время связаны с ошибочными действиями персонала. Особое внимание уделяется отказам технических систем и последующим авариям: выполнен анализ процесса развития аварии, рассмотрены причины отказов и последствия для персонала, сооружения и для окружающей среды. Это явилось основанием для рекомендации путей повышения безопасности сооружений морских нефтегазовых комплексов при их проектировании. Обоснована значимость комплексного подхода к обеспечению безопасности проектируемых морских нефтегазовых сооружений.

**Ключевые слова:** морские технологии, безопасность, отказ, авария, приемлемый риск, защита окружающей среды, недропользование, морские нефтегазовые комплексы.

**SAFETY OF MARINE TECHNOLOGIES.  
SAFETY OF OFFSHORE OIL AND GAS OPERATIONS****I. Aleshin**

Professor, Dr. of Eng., Professor of Department of ocean technics and marine technologies,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: aleshin-igor@mail.ru

**V. Goncharov**

Professor, Dr. of Eng., Professor of Department of ocean technics and marine technologies,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: vkgonch@mail.ru

**E. Zueva**

PhD student of Department of ocean technics and marine technologies,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: zueva\_ekaterina\_smtu@mail.ru

**A. Portnoy**

Assistant professor, PhD of Eng., Professor of Department of ocean technics and marine technologies,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: port\_ocean@mail.ru

**Abstract**

In this work the results of the analysis of modern problems of ensuring the safety of operation of offshore oil and gas complexes in the Arctic regions are given. The analysis and classification of the dangers connected with development of marine oil and gas deposits is carried out. Necessary additions to definition of terms "accident" and "emergency situation" are introduced. By statistical analysis it is shown, that more than half of accidents in the operation of offshore oil and gas complexes are currently associated with erroneous actions of personnel. The special attention is paid to failures of engineering systems and the subsequent emergencies, namely the analysis of process of accident is performed, causes of accidents and consequences for the personnel, for constructions and for environment is considered. It was the basis for the design guidelines to safety increase of the offshore oil and gas complexes constructions. The significance of the system approach to ensuring the safety of the projected offshore oil and gas complexes is substantiated.

**Key words** sea technologies, the safety, acceptable risk, protection of an environment, sea bowels using, sea oil and gas complexes.

**Введение**

Морские нефтегазовые комплексы (МНГК) — часть техносферы, которая в свою очередь является частью биосферы, преобразованной человеком в технические и техногенные объекты (буровые и добычные морские платформы, причальные сооружения, подводные скважины, обслуживающие суда, подводные трубопроводы и т. д.) в целях соответствия внешних условий потребностям человека. Преобразование осуществляется прямым или косвенным воздействием технических средств, которые по [1] включают в себя технику, технические системы и используемую технологию.

Техника МНГК — совокупность средств, созданных для осуществления процессов бурения, добычи, транспортировки сырья и обслуживания потребностей функционирования морского нефтегазопромысла. По мере развития производства техника последовательно заменяет человека в выполнении технологических функций, связанных с физическим и умственным трудом.

Техническая система в составе МНГК — это упорядоченная совокупность отдельных элементов, связанных между собой функционально и взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить выполнение заданных функций при различных состояниях работоспособности.

С позиций обеспечения безопасности задачи разработки технических систем МНГК заключаются в выявлении процесса функционирования элементов системы во взаимодействии с другими ее частями, и по каким причинам могут возникнуть неисправности или произойти отказ, приводящий к негативным последствиям для окружающей среды.

**1. Модель обеспечения безопасности морских нефтегазовых комплексов**

На момент начала проектирования нового технического объекта или технологии морской нефтегазодобычи проектант обладает лишь набором требований заказчика в виде технического задания. Обычно известны в общем виде функции, которые объект должен будет выполнять, и район его эксплуатации. Задача проектанта - создание объ-

екта, который бы обеспечивал максимально рентабельное и безопасное выполнение требуемых функций в заданных районах эксплуатации.

Термин «безопасность» в этимологическом смысле означает состояние, при котором для рассматриваемого объекта любая опасность отсутствует. Учитывая, что абсолютная безопасность (несмотря на наличие подхода при проектировании «концепции абсолютной безопасности») в реальности невозможна, целью проектанта является минимизация опасности на всех стадиях жизненного цикла объекта морской техники.

Пределы такой минимизации ограничены нормативными требованиями и рентабельностью. Соответственно, при соблюдении нормативных требований, проектант должен найти оптимальный баланс между рентабельностью и безопасностью эксплуатации объекта морской нефтегазодобычи.

Таким образом, первым этапом обеспечения безопасности при проектировании можно принять определение круга опасностей, которые могут привести к возникновению аварийной ситуации. Эти опасности обусловлены климатическими и метеорологическими характеристиками района эксплуатации, судоходной и рыбопромысловой деятельностью в этом районе, свойствами пласта и пластовой продукции и многими другими параметрами. Выявленная совокупность опасных факторов представляет собой набор начальных условий для последующего решения задачи обеспечения безопасности.

Вторым этапом является поиск вариантов снижения негативного воздействия опасных факторов до допустимого уровня, соответствующего требованиям нормативной документации в области морской нефтегазодобычи. А далее, из полученных альтернативных вариантов принимается наиболее рентабельный.

Укрупненно концептуальная модель обеспечения безопасности может быть представлена рис. 1.

Как свойство, *опасность* внутренне присуща практически любой сложной технической системе, в том числе МНГК.

*Техногенные явления* при функционировании МНГК — это события, являющиеся следствием эксплуатации технических устройств, механизмов, оборудования и т. п.

Увеличение опасностей при функционировании МНГК, то есть числа и масштабов последствий техногенных аварий и катастроф на морском месторождении, обусловлено ростом сложности производства с применением новых технологий, требующих высоких концентраций энергии, опасных для жизни человека веществ и оказывающих заметное воздействие на компоненты окружающей среды.

## **2. Основные виды опасностей при освоении морского нефтегазового месторождения**

Опасность на МНГК является сложным, иерархическим понятием, имеющим множество признаков. В общем виде опасности могут быть классифицированы различным образом. Одна из классификаций показана в табл. 1. Значительная часть этих опасностей не всегда приводит к возникновению аварии, но усложняет выполнение работ при регламентированной технологии.

Объекты МНГК следует рассматривать как источники повышенной опасности для людей и окружающей среды. Это неизбежный побочный результат научно-технического прогресса. Наблюдается неуклонное повышение добычи и транспортировки, энерговооруженности в промышленности, создаются уникальные по размерам и мощности комплексы для производства электрической энергии, для добычи и транспортирования нефти и газа на море. Все это приводит к постановке проблемы обеспечения безопасности.



Рис. 1. Укрупненная модель обеспечения безопасности МНГК

Таблица 1

Классификация опасностей на МНГК

Принцип классификации	Группы опасностей
По природе происхождения	природные, техногенные, антропогенные, экологические, смешанные
По природе воздействия	физические, химические, биологические, психофизиологические, организационные
По времени проявления отрицательных последствий	импульсивные (в виде кратковременного воздействия, например удар) и кумулятивные (накопление и суммирование действия)
По месту локализации в окружающей среде	связанные с атмосферой, гидросферой, литосферой
По приносимому ущербу	социальные, технические, экономические, экологические и т. д.
По характеру воздействия	активные (оказывают непосредственное воздействие путем заключенных в них энергетических ресурсов); пассивно активные (активизирующиеся за счет энергии, носителем которой является сам объект); пассивные — проявляются опосредованно (коррозия материалов, накипь, недостаточная прочность конструкций, повышенная нагрузка на оборудование, приводящая к разрушениям, взрывам и т. п.)
По характеру ответственности	воздействию опасностей можно подвергаться как добровольно, например, работая на промышленном предприятии, так и принудительно, находясь вблизи места событий в момент реализации опасностей, т.е. можно выделять опасности производственные и непроизводственные (риск для третьих лиц)
По структуре (строению)	простые (электрический ток, повышенная температура) и производные — порожденные взаимодействием простых (пожар, взрыв и т. п.)
По сосредоточению	сконцентрированные (например, выброс и фонтан нефти на МБУ) и рассеянные (например, загрязнение, вызванное этим инцидентом)

Значительное место в проблеме безопасности занимает безопасность при нормальной эксплуатации. Когда возникновение опасности для жизни и здоровья людей и для окружающей среды вызвано нарушениями работоспособности объекта, т.е. его отказом, необходимо особое внимание уделять обеспечению безотказности. Такие отказы должны быть исключены посредством технических и организационных мер, либо вероятность их возникно-

вения в течение нормативного срока службы должна быть снижена до минимума.

Отказы, приводящие к тяжелым последствиям, относят к категории “критических”. К авариям относятся все отказы, наступление которых связано с угрозой для людей и окружающей среды, а также с серьезным экономическим и моральным ущербом.

Аварии могут быть связаны как с исключительными воздействиями (ударными нагрузками, ура-

ганами, наводнениями, пожарами), так и с неблагоприятным сочетанием обычных нагрузок с весьма малой вероятностью появления. Исходной причиной аварии могут служить крупные ошибки, допущенные при проектировании, расчете, изготовлении, монтаже, эксплуатации и техническом обслуживании, а также сочетания этих ошибок с неблагоприятными внешними условиями, не зависящими от технического персонала.

Изучение обстоятельств аварийности [2-3] и травматизма в отраслях показало, что наибольший вред приносят такие источники опасности, как электросиловое оборудование, средства хранения сжатых газов, токсичных и легковоспламеняющихся жидкостей, подвижное технологическое оборудование.

Наиболее типичной причинной целью происшествия оказались следующие предпосылки: ошибка человека или отказ технологического оборудования, или недопустимое внешнее воздействие, случайное появление опасного фактора в производственной зоне; неисправность (или отсутствие) предусмотренных на этот случай средств защиты или неточные действия людей в данных условиях; воздействие опасных факторов на незащищенные элементы оборудования, человека или окружающую их среду.

Доля исходных предпосылок, вызванных ошибочными и несанкционированными действиями человека, составляет от 50 до 80 %, тогда как технических предпосылок – от 15 до 25 %.

Среди факторов, непосредственно приводящих к аварийности и травматизму, выделяются слабые практические навыки работающих в нестандартных ситуациях, неумение правильно оценивать обстановку.

Повседневная деятельность человека потенциально опасна, т.к. связана с различными процессами, связанными с использованием химической, электрической и других видов энергии.

Опасность появляется в результате неконтролируемого выхода энергии, накопленной в оборудовании и материалах, непосредственно в человеке и окружающей среде.

Возникновение происшествий – следствие появления и развития причинной цепи предпосылок, приводящих к потере управления трудовым процессом, нежелательному высвобождению используемой энергии и воздействия ее на людей, оборудование и окружающую среду.

Инициаторами и составными звеньями причинной цепи происшествия являются ошибочные и несанкционированные действия людей, неисправ-

ности и отказы используемой техники, а также нерасчетные (неожиданные и превышающие допустимые пределы) внешние факторы среды обитания.

Объектом исследования и совершенствования безопасности являются системы “человек-машина-среда обитания”, а предметом изучения безопасности являются объективные закономерности возникновения и предвидения происшествий при функционировании таких систем.

Рассмотрим примеры классификации опасностей, приводящих к отказам технических систем на МНГК.

МНГК эксплуатируется в определенных условиях окружающей среды; объекты МНГК испытывают весь комплекс воздействий факторов окружающей среды (климатических, динамических, биологических и др., например, воздействие ветра, волн, льда и т.д.), факторов нагрузки (режим работы и взаимодействие элементов, например, удары и навалы при швартовке танкеров и судов обеспечения и прочее), а также искусственных факторов (преднамеренное воздействие извне). Исходя из опыта проектирования МНГК для северных акваторий, в перечень опасных природных факторов следует включить *плавучие льды, торосы, айсберги* как специфическую угрозу северных акваторий шельфа России.

В отношении второго класса внешних угроз при морской нефтегазодобыче – опасностей техногенного происхождения – нет подобного устоявшегося подхода ввиду их многообразия и постоянного изменения, усложнения техносферы человеком. Однако всех их можно разделить на три основные категории по области возможного воздействия на объект проектирования: воздушные; плавучие; подводные.

Таблица 2

**Факторы, приводящие к появлению отказов технических систем МНГК**

Последствия и факторы, приводящие к ним	
<i>Перегрузка в результате недооценки действующей нагрузки</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ снег и наледь на конструкциях объекта</li> <li>◆ несоответствие фактических масс конструкций проекта;</li> <li>◆ ветер, волны, лед, течения, сейсмические воздействия;</li> <li>◆ динамические воздействия нагрузки;</li> <li>◆ температурные воздействия.</li> </ul>	
<i>Общая и местная потеря устойчивости элементов конструкции</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ошибки в расчетах, чертежах, нарушении технологии работ;</li> <li>◆ низкая экспериментальная отработка проектных решений;</li> <li>◆ возникновение эксцентриситета при приложении нагрузки;</li> <li>◆ податливость монтажных стыков</li> <li>◆ несвоевременное или неправильное закрепление опор;</li> <li>◆ температурные деформации;</li> <li>◆ недостаточная толщина листовых конструкций;</li> <li>◆ искажение геометрических форм конструкций;</li> <li>◆ наличие бухтин, вмятин и других местных искривлений.</li> </ul>	
<i>Ошибочные проектные решения и отступления от проекта</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ неудачный выбор расчетной схемы;</li> <li>◆ низкая точность расчета;</li> <li>◆ недоработка узлов сопряжений;</li> <li>◆ занижение расчетной нагрузки по сравнению с реальной;</li> <li>◆ недооценка жесткости, прочности, устойчивости конструкций;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ замена одного материала другим;</li> <li>◆ низкая квалификация исполнителей;</li> <li>◆ отсутствие авторского и технического надзора;</li> <li>◆ наличие концентраторов напряжений.</li> </ul>
<i>Некачественное изготовление и монтаж конструкций</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ применение некачественных материалов;</li> <li>◆ низкое качество изготовления конструкций;</li> <li>◆ неправильный выбор способа и порядка монтажа;</li> <li>◆ нарушение технологии сварки;</li> <li>◆ ввод в действие сооружений с существенными недостатками.</li> </ul>	
<i>Нарушение правил эксплуатации конструкций и сооружений</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ отсутствие защиты конструкций, работающих в агрессивных средах, при колебаниях температуры и влажности;</li> <li>◆ взрывы, пожары, затопления;</li> <li>◆ вибрации, удары, истирание;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ отсутствие надлежащего инструментального контроля;</li> <li>◆ перегрузка;</li> <li>◆ форсирование нагрузки без усиления конструкций и регулирования напряжений в них.</li> </ul>
<i>Усталость, вибрация, коррозия и старение материала</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ усталостные разрушения;</li> <li>◆ разрушения от процессов старения;</li> <li>◆ вибродинамическое действие;</li> <li>◆ загрязнение окружающей среды;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ наличие поверхностных дефектов в конструкциях;</li> <li>◆ резкие колебания температуры;</li> <li>◆ осадки.</li> </ul>
<i>Непредвиденные (непрогнозируемые) причины</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ аварии от провалов, подвижек донного грунта, обрушений вышележащих конструкций;</li> <li>◆ сейсмические воздействия и извержения вулканов;</li> <li>◆ грозовые разряды, град, падение метеоритов;</li> <li>◆ аварии от биологических вредителей;</li> <li>◆ ураганы, тайфуны, цунами, ледоходы;</li> <li>◆ пожары;</li> <li>◆ размыв фундаментов донными течениями и волнами</li> </ul>	

### 3. Типы аварий на МНГК и их развитие

На МНГК источниками опасности являются: человек; объекты, формирующие трудовой процесс, и входящие в него предметы труда, средства труда (машины, станки, инструменты, энергия и т. п.); продукты труда; технология, операции, действия; природно-климатическая среда (ураганы, тайфуны, цунами, лед и т. т.п.). При анализе обстановки среды выделяют по [1] как внешние, так и внутренние источники опасности.

*Внешние источники опасности* разделяются на две группы явлений: состояние среды деятельности (технические системы) и ошибочные, непредвиденные действия, приводящие к авариям и создающие для окружающей среды и людей рискованные ситуации.

*Внутренние источники опасности* обусловлены личными особенностями работающего, которые связаны с его социальными и психологическими свойствами и представляют субъективный аспект опасности.

Эксплуатация технических систем практически всегда потенциально опасна, так как связана с различными процессами, а последние — с использованием (выработкой, транспортировкой, хранением и преобразованием) химической, электрической и других видов энергии, накопленной в оборудовании и материалах, непосредственно в человеке и окружающей среде. Опасность проявляется в результате неконтролируемого выхода энергии. В определенных условиях неконтролируемый выход энергии сопровождается происшествиями и человеческими жертвами.

Процесс развития опасности на МНГК можно описать логической последовательностью, представленной на рис. 2.

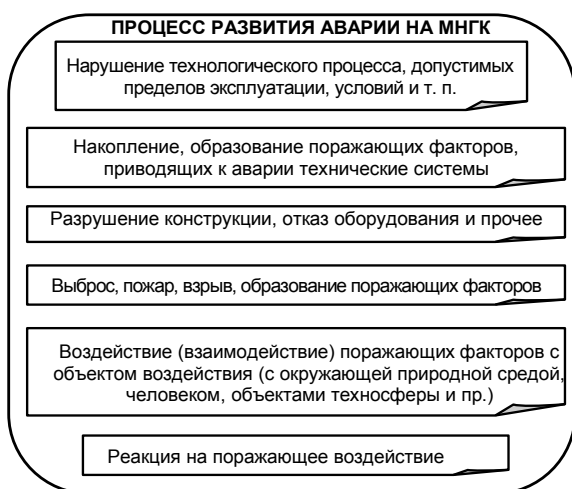


Рис. 2. Развитие аварии на МНГК

В зависимости от особенностей технической системы, отдельные элементы приведенной цепи могут отсутствовать. Каждому такому событию можно приписать частный показатель в виде вероятности события:

1. вероятность отказа технической системы;
2. вероятность аварийного исхода;
3. вероятность образования поражающих факторов;
4. вероятность поражения объектов воздействия;
5. вероятность вторичных поражающих факторов;
6. вероятность воздействия;
7. вероятность поражения.

Из приведенной логической последовательности следует, что наличие потенциальной опасности в системе не всегда сопровождается ее негативным воздействием на объект. Любое исключение в цепи ведет к тому, что опасность не реализуется. В общем случае для реализации опасности необходимо выполнение минимум трех условий: опасность реально действует; объект находится в зоне действия опасности; объект не имеет достаточных средств защиты.

Анализируя статистические данные MMS (Minerals Management Service, USA) по аварийности МНГК Мексиканского залива, можно отметить закономерность, отраженную в диаграмме на рис. 3. [4-8].

Данная диаграмма показывает, что более 70 % всех аварий на МНГК Мексиканского залива совокупно происходили по двум причинам: отказы оборудования и ошибки персонала.

Это же подтверждают и другие материалы в процессе классификации аварий, приведших к негативным экологическим последствиям (рис. 3).

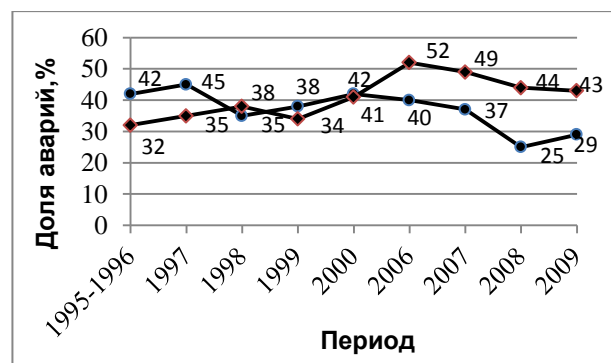


Рис. 3. Статистика причин аварий на МНГК  
♦ - «человеческий» фактор, • - отказы оборудования

Глобальная цель обеспечения безопасности (ГЦОБ) – минимизация возможности нанесения вреда. Опасный фактор является причиной нештатной ситуации на объекте, которая потенциально может иметь последствиями нанесение вреда одной или нескольким целям обеспечения безопасности. Подобные нештатные ситуации принято называть авариями.

Однако в российской нормативной базе не существует единого подхода к определению термина «авария».

По Правилам Российского морского регистра судоходства (РМРС) [7] по нефтегазовому оборудованию авария – это разрушение сооружений и/или технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемый взрыв и/или выброс опасных веществ.

По Правилам РМРС по классификации плавучих буровых установок (ПБУ) авария - это нештатное событие (происшествие), возникновение которого не ожидается во время обычного функционирования платформы, и которое может вызвать существенные повреждения конструкции, если оно не учтено при проектировании.

По [7], а также правилам ведения работ на опасном производственном объекте, инцидент – это отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от режима технологического процесса.

По Правилам РМРС по классификации ПБУ аварийная ситуация - это эксплуатационная ситуация, во время которой может реализоваться авария.

Анализ этих определений выявил, что:

1. по Правилам РМРС по классификации ПБУ пожар и взрыв отнесены к аварийным ситуациям, хотя в соответствии с определениями этого документа, они могут считаться авариями;
2. по Правилам РМРС по нефтегазовому оборудованию взрыв отнесен к аварийным ситуациям, хотя в самом документе приведено определение, однозначное трактуемое взрыв как аварию;
3. термин «аварийная ситуация» по Правилам РМРС по нефтегазовому оборудованию не расшифрован, хотя активно используется, в том числе применительно как к взрыву, так и к пожару, опрокидыванию, фонтанированию и др.

Для обеспечения однозначности терминологии, под *аварией* будем понимать результат реализации опасности, а для *аварийной ситуации* будем использовать определение согласно Правилам РМРС по классификации ПБУ: эксплуатационная ситуация, во время которой может реализоваться авария.

Проблема поиска мер обеспечения безопасности основывается на следующих положениях.

1. Первичным негативным последствием воздействия опасного фактора на технический объект

является аварийная ситуация, которая может привести к аварии.

2. В ходе реализации аварии возникают негативные последствия, которые следует оценить по назначенным критериям на допустимость.

3. Определив последствия воздействия как неприемлемые, необходимо принять меры по приведению их в требуемые пределы.

Соответственно, технические и организационные меры по обеспечению безопасности объекта проектирования принимаются в рамках трех основных направлений:

1. Предупреждение возникновения аварий на объекте;
2. Локализация, недопущение распространения и эскалации аварий;
3. Ограничение (минимизация) негативных последствий аварий.

Задачей проектанта является создание необходимого и достаточного комплекса мер по этим трем направлениям с учетом того круга опасностей, которые угрожают будущему объекту морской нефтегазодобычи.

Рациональным при определении мер будет использование подхода «от простого к сложному», т.е. рассмотрение каждой аварии по отдельности. Далее полученные варианты мер обеспечения безопасности по каждой аварии собираются в единый комплекс обеспечения безопасности. При этом необходимо проанализировать их взаимовлияние, а также рассмотреть альтернативные варианты, поскольку каждая отдельная задача может быть решена не одним, а несколькими способами.

## Заключение

В работе выполнен анализ обеспечения безопасности морских нефтегазовых комплексов. Рассмотрены виды опасностей при освоении морского нефтегазового месторождения. Путём статистического анализа показано, что более половины аварий при эксплуатации морских нефтегазовых комплексов в настоящее время связаны с ошибочными действиями персонала. Рассмотрен процесс развития аварии на МНГК. Даны рекомендации путей повышения безопасности сооружений морских нефтегазовых комплексов при их проектировании. Обоснована значимость комплексного подхода к обеспечению безопасности проектируемых морских нефтегазовых сооружений.

## Литература

1. Малкин В. С. Надежность технических систем и техногенный риск. Ростов на Дону: Изд. ФЕНИКС, 2010, 432 с.
2. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Техногенный риск и безопасность. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001, 170 с.



3. Ветошкин А.Г., Марунин В.И. Надежность и безопасность технических систем. /Под ред. доктора технических наук, профессора, академика МАНЭБ А.Г.Ветошкина. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002, 129 с.
4. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 1995-1996. OCS Report, MMS 98 0030.
5. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 1997.
6. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 1998. OCS Report, MMS 2000 021.
7. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 1999. OCS Report, MMS 2001 015.
8. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 2000. OCS Report, MMS 2002 016.

#### References

1. Malkin V. S. Nadezhnost' tehniceskikh sistem i tehnogennyj risk. Rostov n/D, Feniks, 2010, 432 p.
2. Vetoshkin A.G., Taranceva K.R. Tehnogennyj risk i bezopasnost'. Penza, PGU, 2001, 170 p.
3. Vetoshkin A.G., Marunin V.I. Nadezhnost' i bezopasnost' tehniceskikh system, Penza, PGU, 2002, 129 p.
4. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 1995 1996, OCS Report, MMS 98 0030.
5. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 1997.
6. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 1998, OCS Report, MMS 2000 021.
7. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 1999, OCS Report, MMS 2001 015.
8. Accidents Associated With Oil And Gas Operations. Outer Continental Shelf 2000, OCS Report, MMS 2002 016.

## ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.12.001

### КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВОДОМЁТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ СУДОВ

**Ада Шоломовна Готман**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории и устройства корабля  
Сибирский государственный университет водного транспорта  
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33  
тел. (383) 222-64-68; e-mail: ada.gotman@yandex.ru

**Андрей Анатольевич Девяткин**

Старший преподаватель кафедры теории и устройства корабля  
Сибирский государственный университет водного транспорта  
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33  
тел. (383) 221-47-51, e-mail: ktuk@nsawt.ru

**Михаил Анатольевич Титов**

Старший преподаватель кафедры теории и устройства корабля  
Сибирский государственный университет водного транспорта  
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33  
тел. (383) 221-47-51, e-mail: ktuk@nsawt.ru

**Аннотация**

Статья посвящена использованию водомётных движителей на судах разного типа и представляет собой обзор теоретических, экспериментальных и практических работ в этой области. Прослеживается история создания водомётных движителей, начиная с 17-го века до наших дней.

Отмечены создатели основ теории водомётов, начиная с Н.Е.Жуковского и другие отечественные специалисты, внесшие наибольший вклад в разработку методики расчётов водомётных движителей в прошлом и работающих в этой области в настоящее время.

Показана разница между проектированием и применением водомётных движителей в России и за рубежом. Принципиальная разница состоит в том, что за рубежом в водомётном движителе используются готовые стандартные насосы, а не проектируется рабочее колесо. Современные экспериментальные исследования за рубежом направлены на борьбу с кавитацией, потому что водомёты в основном применяются на быстроходных судах, как правило, на катамаранах и многокорпусных судах.

В статье указаны обзорные работы по отечественным и иностранным водомётным движителям.

Статья может быть полезна аспирантам, научным работникам и инженерам, начинающим заниматься водомётными движителями.

**Ключевые слова:** история, обзор, отечественные и иностранные водомётные движители, суда с водомётами

### SHORT HISTORY OF WATER JET PROPULSION OF SHIPS

**A. Gotman,**

the professor, Dr.Sci.Tech.,

Professor of Ship Theory Department,

FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION «SIBERIAN STATE UNIVERSITY OF WATER TRANSPORT»

e-mail: ada.gotman@yandex.ru

**A. Devjatkin**

associate professor, Candidate of Technical Sciences,

FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION «SIBERIAN STATE UNIVERSITY OF WATER TRANSPORT»

e-mail: ktuk@nsawt.ru

M. Titov

Senior Lecturer of Ship Theory Department

FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION «SIBERIAN STATE UNIVERSITY OF WATER TRANSPORT»

e-mail: ktuk@nsawt.ru

### Abstract

The article is devoted to the use of water jet propulsion on different vessels and represents a review of theoretical, experimental and practical works in the field of ship propulsion. Also, the history water jet propulsion creation is traced, from the 17th century to modern times.

The founders of water jet theory are discussed, from N.E.Zhukovsky to other Russian experts who made great contributions to the development of water jet propulsion calculation techniques both in the past and in the present.

The difference between design and use of water jet propulsion in Russia and abroad is shown. This basic difference is that foreign designers use standard pumps for water jets and do not design driving wheels.

Modern researches are fighting against cavitation because water jets are generally used on high-speed vessels: as a rule on catamarans and on multihull vessels.

Review papers on Russian and foreign water jet propulsion are shown.

This article can be useful to graduate students, scientists and engineers taking an interest in water jet propulsion.

**Key words:** history, review, Russian and foreign water jet propulsion, vessels with water jet

### Введение

В обзорной статье 1999 года Н. Корытов [15] пишет, что к преимуществам водомётного движителя можно отнести:

1. более низкие уровни гидроакустического шума и вибрации корпуса;
2. отсутствие на корпусе выступающих частей и связанного с ними дополнительного сопротивления воды движению. Здесь следует отметить, что на современных судах для уменьшения потерь в водозаборнике всю водомётную установку помещают в обтекатель, расположенный под корпусом.
3. возможность реверсирования судна (путем изменения направления реактивной струи) при постоянном вращении двигателя в одном направлении, что повышает мотто-ресурс энергетической установки;
4. лучшая управляемость судна в широком диапазоне скоростей переднего и заднего хода;
5. возможность эксплуатации лопастного механизма водомётного движителя при высоких скоростях хода без кавитации;
6. возможность лучшего соответствия водомётного движителя двигателю при увеличении сопротивления движению вследствие обрастания корпуса, при ходе на волнении, при изменении нагрузки судна и т.п.

7. На скоростях более 50 км/час сопротивление винто-рулевого комплекса существенно увеличивает общее сопротивление движению. У водомёта нет выступающих частей, поэтому обтекание корпуса остается непрерывным, и увеличения сопротивления нет.

По результатам испытаний моделей и эксплуатации построенных водомётных судов известно, что в диапазоне малых и умеренных скоростей хода (15-25 узлов) водомет по пропульсивным качествам уступает гребному винту. При

скоростях более 40 узлов, когда к.п.д. винта снижается из-за кавитации, а рабочее колесо водомётного движителя может быть спроектировано некавитирующим, оба типа движителя становятся сравнимыми по к.п.д. При еще более высоких скоростях (свыше 50 узлов) водомет превосходит гребной винт по эффективности. По этой причине при увеличении эксплуатационных скоростей судов водомётный движитель находит всё большее применение не только на катерах, но и на грузопассажирских паромеях и других судах.

Ежегодно проводятся международные конференции по водомётам (International Waterjet conference), находящим самое различное применение. Размеры водомётов изменились от малогабаритных (рис. 9) до больших. Шведской фирмой "KaMeWa" построен самый большой в мире водомёт на мощность — 50000 кВт (рис. 1). Однако до этого прошло больше трёх столетий.

### 1. История создания водомётных движителей

Идея создания водомётных движителей возникла еще в XVII веке. Принцип отброса воды на основе архимедова винта известен по двум изобретениям 1661 года в Англии, но только с изобретением Уаттом парового двигателя в 1765 году были достигнуты осязаемые результаты, когда Раррис и Мейен создали насос с паровым приводом для откачки воды из трюмов судов с выбросом струи воды через корму.

Еще в 1784г. Джеймс Рамсей продемонстрировал на реке Потомак в США первый паром с водомётным движителем.

За период с 1830 по 1860 год только в одной Англии было выдано около 35 патентов на реализацию таких устройств.

Практическая реализация гидрореактивного двигателя, установленного на шлюпке, была осуществлена А.А.Саблуковым в 1840 г. В 1853 году

преподаватель практической механики Корабельно-инженерного училища Н.Н.Бажерянов впервые провёл модельные испытания таких водопроточных систем. В 1844 году по предложению Н.И. Якубинского впервые в мире была использована идея водопотока в виде воздушного реактивного движителя для летательных аппаратов с той разницей, что вместо воды «воздух всасывается впереди и выбрасывается сзади». Это положило начало создания воздушного реактивного двигателя.

К концу XIX века, в эпоху королевы Виктории, водомёты были опробованы на самых разных судах. Так, Британское Адмиралтейство приняло проект водомёта с крыльчаткой, которая в конце 1860-х гг. была заменена обычным винтом. Адмиралтейство зашло так далеко, что даже согласилось провести натурные испытания двух типов движителей. Были построены две одинаковых канонерки длиной 4,2 метра, на одной из которых был установлен водомёт, а на другой - обычный гребной винт. «Реактивная» канонерка с центробежным насосом, который выбрасывал воду через два отверстия в корме, при мощности мотора в 760 л.с., развила скорость 17 км/ч, в то время



Рис.1. Самый большой в мире водомет "KaMe-Wa" для паромов

как канонерка с традиционным винтом с мотором мощностью 696 л.с. развила скорость 18 км/ч.

В 1867 году в «Морском сборнике» была опубликована обзорная статья по водомётам, а в 1887 году там же были приведены теоретические исследования проф. Ф.А.Брикса, где была впервые сформулирована мысль, что наиболее выгодные обводы судна в их сочетании с работой движителя могут быть осуществлены только у водомётов.

В 1883 г. С.К. Джевецкий предложил военно-инженерному ведомству, в ведении которого находились серийные подводные лодки его конструкции, в виде опыта модернизировать две из них водомётными движителями, заменив pedalный привод электромотором, питающимся от аккумуляторной батареи.

На подводной лодке с водомётным, или, как его называл С.К.Джевецкий, гидрореактивным движителем, забортная вода засасывалась центробежным насосом через трубу, проходящую через носовую часть корпуса, и отводилась за борт по двум трубам, оборудованным поворотными насадками (рис. 2). При помощи привода

насадки изнутри лодки можно было поворачивать отверстия назад или вперед, а также вверх и вниз, благодаря чему осуществлялись передний или задний ход лодки, ее погружение и

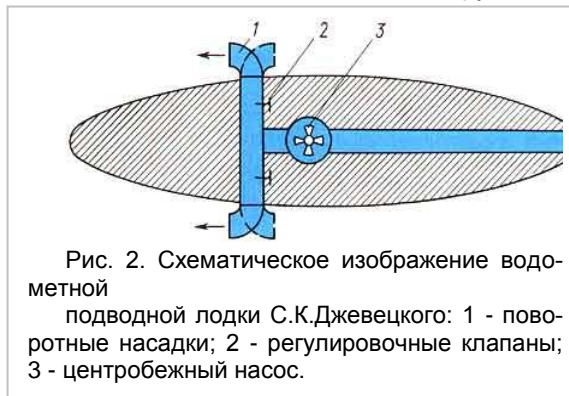


Рис. 2. Схематическое изображение водометной подводной лодки С.К.Джевецкого: 1 - поворотные насадки; 2 - регулировочные клапаны; 3 - центробежный насос.

ли всплытие. Движитель позволял управлять лодкой и в горизонтальной плоскости, в связи с чем отпадала необходимость в вертикальном руле, также являвшемся выступающей частью. Это была первая в мире подводная лодка, на которой движитель предназначался не только для движения, но и для управления. Кроме того насос движителя мог использоваться для откачки воды из балластных цистерн при всплытии подводной лодки и как водоотливное средство при авариях, когда вода поступает внутрь корпуса. Получив одобрение в 1885г., С.К.Джевецкий закончил переоборудование лодок. Обе подводные лодки были испытаны на Неве. Винтовая развила скорость около 4 уз, а водометная - менее 3 уз. Кроме того, водометный движитель оказался чрезмерно сложным в эксплуатации.

Примерно в то же самое время в нескольких европейских странах возник интерес к водомётному принципу движения морских судов. В 1878 году через 12 лет после экспериментов в Англии, шведское правительство провело серию аналогичных экспериментов по внедрению водомётного принципа движения на торпедных катерах. Винтовые суда с моторами в 90 л.с. показали скорость 18,5 км/час, а водомётные (с моторами в 78 л.с.) развили скорость 15 км/ч.

Годом позже в Германии были организованы аналогичные испытания судна с водомётом, названным «Hydro»-мотором. Также, как и их предшественники, немцы быстро разочаровались в возможностях водомётного принципа движения. Во всех сравнительных испытаниях винтовых двигателей и водомётов с центробежными насосами, первые показали себя лучше.

В 1888г. был опубликован доклад инженера А.А.Брандта с интересными сведениями о мелко-сидящем судне, имеющем гребной винт с направляющим аппаратом, установленным в трубе. Судно было построено и испытано.

В том же году Британский Национальный институт спасательных судов разместил первый в мире заказ на постройку лодки с водомётом. Катер был оснащен водомётом с центробежным

насосом и должен был заменить винтовые суда при проведении спасательных операций на мелководье или в заиленных водоемах.

Считается, что новозеландский овцевод и изобретатель Крис Уильям Файлден Гамильтон (Hamilton, 1899 г.р.) является изобретателем современного водомётного мотора, сам он опровергает это мнение. В 1962 году, ответив на прямой вопрос по этому поводу, он сказал: «Я не претендую на авторство изобретения судового водомёта».

В 1908г. А.И.Пермяков опубликовал статью «Пароходы, приводимые в движение струёй воды» В ней он привёл данные испытанного им и построенного по его проекту в 1907 г. в г.Пермь специального судна.

Хорошие результаты были достигнуты в 1926 г. на небольшом водомётном катере, построенном по схеме Ф.А.Брикса. В его схеме винт использовался в качестве насоса, подсасывающего воду с носа судна через два канала, проходящие внутри судна и отбрасывающие её через общий канал в корму. Водомёт Ф.А.Брикса показал удовлетворительные пропульсивные качества, но не получил распространения из-за неудобства внутреннего расположения. С этого времени интерес к водомётам несколько упал, но получили распространение гребные винты в насадках и тоннельные обводы. Из них наиболее экономичным оказался тип МСВ-39Д, имевший буксировочный к.п.д. 19,5%. Но в этих судах, хотя и имевших небольшую осадку 0,4 м, вопрос о защите движителя не был решён. В связи с этим возник вопрос о водомётном движителе, что стало предметом дальнейших исследований.

В 1943г. ЦНИИРФ осуществил проект водомётно - конусного движителя мощностью 30л.с. Судно с таким движителем имело размеры 13,5×3,0 с осадкой 0,25 м. Несмотря на его низкие пропульсивные качества, был решён вопрос о защите движителя, и судно стало эксплуатироваться на реках Средней Азии.

## 2. Разработка теории

Д.Бернулли в XVIII веке теоретически предсказал принцип гидрореактивного движителя, а в 1838 году при испытаниях на реке Неве первого в мире электрохода, изобретённого русским учёным Б.С.Якоби, была высказана мысль, что «...если провести непрерывный поток воды сквозь корабль с носа на корму, то корабль получит тем большую скорость, чем большая скорость водяного тока, а число фунтов выбрасываемой воды и скорость, с которой она выбрасывается, определит силу машины». Это было первое предложение о практическом применении упомянутого принципа, предсказанного Д.Бернулли.

В этот же период были заложены основы теории водомётных движителей. Н.Е.Жуковский впервые записал выражение для тяги водомётного движителя в современном виде. В своих работах, опубликованных в 1882 и 1886 годах Н.Е.Жуковский, пользуясь методами теоретической гидромеханики, впервые строго решил задачу о реакции втекающей и вытекающей жидкости

по отношению к сосуду, погруженному в безграничную массу неподвижной или движущейся жидкости. Н.Е.Жуковский показал перспективность применения водомётных движителей для судов. В 1908 году Жуковский опубликовал работу [12], в которой впервые поставил задачу о взаимодействии водомётного движителя с корпусом судна. Он доказал, что, если не учитывать потерь на



Рис. 3. Водомётный теплоход «Заря». Главные размерения: длина – 22,4 м, ширина – 4,6 м., осадка неподвижного – 0,5 м.осадка на ходу – 0,4 м. мощность двигателя – 900 л.с.

трение и гидравлических потерь, то выражение для затрачиваемой насосом мощности не зависит от способа забора воды: с передней части судна, с его бортов или с кормы.

Разработанная Н.Е.Жуковским теория взаимодействия водомётного движителя с корпусом судна позволяет оценить влияние попутного потока на эффективность водомётного движителя. Кроме того, Н.Е.Жуковский показал, что при заборе воды вблизи кормы может происходить отсос пограничного слоя, что приводит к уменьшению сопротивления у плохообтекаемых судов.

Максимальная схематизация потока движителя привела к понятию «идеального, оптимального, изолированного движителя».

В 1944 году проф. И.М.Коновалов предложил конструкцию движителя, назвав его пропеллерно - щелевидным. Постройка судна с этим движителем и подробные натурные испытания позволили получить лучшие пропульсивные качества по сравнению со всеми имевшимися в то время однотипными судами, оборудованными водомётными и винтовыми движителями. Полученные им результаты удовлетворяли требованиям, предъявляемым к судам с условиями плавания на мелководьях и засорённых реках. [13]

Одновременно с разработкой новой конструкции [14] водомётного движителя И.М.Коновалов начал строгое изложение принципов его работы. Его метод был положен в дальнейшем в основу метода расчёта водомётов А.М.Басина, который выполнял свои первые работы по теории и расчётам водомётных. Первый вывод, который сделал И.М.Коновалов заключается в том, что выбор наиболее рациональных форм водомётной трубы и тщательность отделки её внутренних поверхностей имеют очень большое значение (что в своё время опровергал

Н.Е.Жуковский). Второй вывод И.М. Коновалова заключался в том, что при одной и той же высоте выброса струи в атмосферу максимальное к.п.д. изменяется в зависимости от величин скорости движения судна.

Учёные сороковышних годов занимались двигателями разного типа М.Я.Алферьев в г.Горький и А.М. Басин в г.Ленинград. М.Я.Алферьев [2] занимался гребными винтами и колёсными двигателями, А.М.Басин в то же время работал над открытыми гребными винтами и винтами в насадке.

Постепенно сформировались разные направления развития теории водомётов. Это описано в книге С.В.Куликова, М.Ф.Храмкина [17]. Первое направление было предложено А.М.Басиным. Оно представляло собой исследование взаимодействия корпуса судна с проточным каналом и гребного винта. Изучалось взаимодействие полей скорости вокруг корпуса судна, проточного канала и гребного винта. Так как расчёты этих полей невозможны, А.М.Басин предложил экспериментальное определение коэффициентов попутного потока и засасывания на основе теории эквивалентных условий работы гребных винтов в проточном канале за корпусом и в свободной воде. Использование этих коэффициентов позволяет проектировать водомётные двигатели при различных условиях задания.

Продолжателями первого направления были В.М.Анфимов [4], М.И.Френкель [6], С.П.Медведев [7], И.М.Чёрный [9], И.Я.Мининович [8].

При использовании второго направления И.М.Коновалова и А.А.Литвинова учитывается влияние корпуса на работу водомётного двигателя с помощью введения в формулу Н.Е.Жуковского поправочных коэффициентов, учитывающих реальные условия забора и выброса жидкости и напорные характеристики водомётных двигателей. Конструктивные элементы лопастных систем рабочего колеса и спрямляющего аппарата, как гидравлической машины, выбираются по заданному расходу и напору водомётной системы по данным серийных испытаний насосов или по результатам теоретических расчётов. Этот метод получил распространение после того, как М.А.Мавлюдов и В.М.Гринпресс с В.А.Басиным [18] получили экспериментальные данные о гидравлических потерях в проточных каналах водомётных двигателей различных конструкций в зависимости от работы водомёта. Это направление получило применение для судов с динамическими принципами поддержания, судов мелкого судостроения для малотоннажных судов (А.Н.Папир). [19]

С.В.Куликов и М.Ф.Храмкин пытались объединить оба направления и учесть при этом влияние пограничного слоя и получили приближённые зависимости для использования при проектировании результатов систематических испытаний гребных винтов в свободной воде и насосов. В результате своих исследований авторы прихо-

дят к вопросу о кавитации водомётных двигателей.

### 3. Современные водомёты

К концу столетия стало ясно, что при существующих скоростях движения судов водомёты по эффективности уступают гребным винтам. Относительно низкий к.п.д. водомётных двигателей обусловил их применение только в тех случаях, когда возможность размещения двигателя внутри корпуса и защищённость от ударов рабочего колеса о плавающие предметы играли определяющую роль.

Эти особенности наиболее четко проявились на речных судах<sup>1</sup>. Начиная с 50-х годов, двадцатого столетия для рек в Советском Союзе строился большой транспортный флот, на судах которого широко применялись водомётные двигатели. Это были буксиры, небольшие танкеры, сухогрузные и пассажирские суда мощностью, не превышающей 700 л.с., и строили эти суда большими сериями. Например, пассажирских судов типа «Заря» было построено более 300 штук (рис.3).

Более мощные водомётные двигатели начали использоваться на судах с подводными крыльями, потому что при больших скоростях кавитация гребных винтов приводит к падению к.п.д., и их преимущества по этому параметру по сравнению с водомётным двигателем уменьшаются. В 1962 году началось строительство скегового судна на воздушной подушке типа «Чайка» (рис. 4) с водомётным двигателем мощностью 1230 л.с., обеспечивающим судну скорость до 95 км/час.

Самым большим кораблем среди скеговых судов, оборудованным водомётным двигателем, является «Буревестник», построенный в 1964 году (рис. 5). Он был оборудован двумя водомёт-



Рис. 6. Опытный корабль с двумя водомётными двигателями

ными двигателями мощностью около 2700 л.с. на валу и развивал скорость до 95 км/час. Все водомётные двигатели судов такого типа имели статические водозаборники с щелевым забором, вытянутым вдоль судна и осевые насосы. В отличие от речного судна «Чайка», имеющего в качестве главного двигателя дизель, на судне «Буревестник» были применены конвертированные авиационные газовые турбины, поэтому данное отличное по эксплуатационным характеристикам судно было построено в единственном экземпляре.

<sup>1</sup> Приведенный здесь текст и фотографии взяты из интернета по ссылке Источник: <http://korabley.net>



Рис. 4. Скеговое судно на воздушной подушке типа «Чайка»

Советский речной флот не располагал необходимой ремонтной базой для обслуживания таких двигателей.

Следующий этап развития водометных двигателей был связан с военно-морским флотом СССР. В 1956 году началось проектирование противолодочного корабля водоизмещением около 400 тонн, который должен был развивать скорость свыше 30 узлов. В этот период в стране не было дизелей, агрегатная мощность которых обеспечивала бы подобную скорость при двухвальной установке. В связи с этим было принято решение создать оригинальный двухступенчатый водометный движитель. Был построен и корабль с таким движителем. На экономических ходах работала только первая ступень, а на полных ходах, когда суммарная мощность на валу достигала 21700 л.с., использовались обе ступени (рис. 6). В результате общий коэффициент пропульсивной установки на полном ходу не превышал 0,35. Несмотря на низкую эффективность, было построено 63 корабля, которые эксплуатировались в ВМФ СССР, Болгарии и Румынии. Однако дальнейшего применения эти двигатели, получившие название газо-водометных, не получили. В связи с развитием в 70-х годах кораблей с динамическими принципами поддержания были развернуты работы по созданию водометных двигателей для скеговых кораблей на воздушной подушке. В этот период были спроектированы и серийно строились скеговые пассажирские суда на воздушной подушке по трем проектам: «Зарница», «Орион» и «Чайка» (рис. 2).

Накопленный опыт позволил перейти к созданию оборудованных водометами кораблей на воздушной подушке для военно-морского флота СССР.

В период с 1965 по 1975 год в Советском Союзе были созданы самые быстроходные суда и самые большие в мире корабли на глубокопогруженных подводных крыльях. Они имели в качестве главных двигателей угловые колонки мощностью 17680 л.с. Однако эти колонки имеют весьма сложную конструкцию, дороги и недоста-

точно надежны. Поэтому были развернуты работы по созданию водометных движительных комплексов для судов на подводных крыльях. Поскольку эти корабли были рассчитаны на максимальную мореходность 5-6 баллов, для уменьшения вероятности прорыва воздуха к насосам предполагалось применить полнонапорные водозаборники.



Рис. 7. Пассажирский катер «Невка»

С целью проверки эффективности предложенной конструкции водометный движитель с таким водозаборником был установлен на пассажирском катере «Невка» (рис. 7), испытания которого подтвердили его работоспособность.

В 80-х годах началось проектирование более крупного судна на воздушной подушке водоизмещением около 600 тонн с двумя двигателями мощностью около 40000 л.с. и водометным движителем. Испытания модели на открытом водоеме показали высокую эффективность крыльевого и движительного комплекса, что позволило разработать проект корабля. Проблема работы водометного движителя, в насос которого прорывается воздух стала особенно острой после создания судов с каверной на днище (рис.8), из хвостовой части которой воздух попадает в район водозаборного отверстия водомета. В связи с этим была сформулирована идея водометного движителя, работающего в условиях непрерывной подачи воздуха на рабочее колесо. В настоящее время иностранные водометы проектируются с вдуванием воздуха для уменьшения потерь из-за кавитации.

Вентилируемый водомет был испытан на скеговом корабле на воздушной подушке, конструктивно такой движитель существенно проще традиционного водомета, при его использовании для управления кораблем используются расположенные вне струи рули, а реверс осуществляется за счет изменения направления вращения рабочего колеса. В связи с этим вентилируемые водометы требуют применения реверсивных двигателей.

Подобными водометными движителями была оборудована серия десантных кораблей с каверной на днище (рис. 8), которые показали хорошие эксплуатационные качества. В настоящее время водометный движитель традиционной конструкции успешно эксплуатируются на кораблях и судах различных типов. Однако этим водометам присущи некоторые недостатки, основными из которых являются высокие массогабаритные ха-



Рис. 8. Десантный корабль с каверной на днище

рактеристики и сложность конструкции рабочих колес и реверсивно-рулевых устройств. Как следствие этого, для их изготовления требуется специализированное высокотехнологичное производство, а стоимость их соизмерима со стоимостью двигателей. Кроме того, в случае кавитации и попадания воздуха в рабочее колесо тяговые характеристики водометного движителя существенно ухудшаются. Для частичного преодоления этих недостатков разработана конструкция малогабаритного водометного движителя, основной конструктивной особенностью которого является отказ от традиционной круговой формы выбросного сопла и многолопастного спрямляющего аппарата за рабочим колесом, что позволило снизить габарит водомета на 30 процентов.

Малогабаритный водометный движитель (рис. 9) имеет удлиненную в поперечном направлении сопло прямоугольной формы и пару рулей, частично пересекающих сопло.

В 1990 году в журнале «Катера и яхты» была опубликована обзорная статья о водомётах для катеров, моторных яхт, быстроходных кораблей и судов с динамическими принципами поддержания [15].

В 2003 году малогабаритный водометный движитель был впервые продемонстрирован на катере «Атлас» (рис. 9).

К настоящему времени в отечественной литературе описано несколько методов расчёта водомётов.

В 2014 году опубликована статья [1] о проектировании водомётного движителя для глиссирующего судна. До этого глиссирующими судами занимались в Крыловском научном центре, как

указывалось

выше,

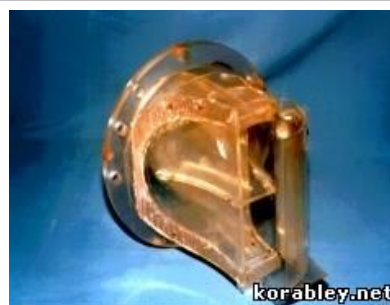


Рис. 9. Малогабаритный водомётный движитель

М.А.Мавлюдов, В.М.Гринпресс, А.А.Русецкий и др. [18], занимались этой проблемой в ЛИВТЕ А.М.Басин и М.И.Френкель [6].

Расчёты водомётов для быстроходных катеров разрабатывал Ю.М. Войнаровский [10], [11].

#### 4. Иностранные водомётные движители

Если сравнить теоретический подход и методы расчёта водомётных движителей, то следует отметить, что отечественная наука и практика шли по пути совершенствования методов расчёта рабочего колеса водомёта, его диаметра, шагового отношения и формы лопастей. За границей эти вопросы решают при проектировании насосов, а при проектировании водомётного движителя оценивают к.п.д. различных частей водомёта в зависимости от выбранного насоса. Подобный метод использовали в своей книге С.В.Куликов и М.Ф.Храмкин [17], приводя практический метод расчёта водомётного движителя. В расчёте они выбирали из насосов ОД-10, ОП-3 и ОП-5. В связи с этим следовало бы рассматривать работы по проектированию насосов, но это уже другой вопрос. Следует отметить, что между этими двумя подходами к проектированию водомётов существует принципиальная разница.

Для ознакомления с иностранными работами по водомётным движителям в теоретическом, экспериментальном и практическом отношении можно использовать книгу Н.Боултена «Численный анализ пропульсивных систем водомётов» [27].

За границей водомётных движителей широко применяются для судов, скорость которых больше или равна 30 узл., за исключением случаев, когда водомётный движитель имеет низкий к.п.д., но зато даёт возможность судну ходить по мелководью или по загрязнённому водоёму.

Дж.Рохман [39] в статье о применении водомётных движителей на морских судах пишет, что водомёты становятся необходимыми, когда скорость судна достигает 30 узлов, где обычные винты мало применимы из-за кавитации. При этом любые суда, проектируемые для высоких скоростей, требуют низкого сопротивления и, следовательно, узких корпусов. Движитель в этом случае необходимо проектировать на большую мощность, что требует соответствующего диаметра.



В статье Дж.Рохман даётся математический анализ разных типов сопла водомётотв от ранних до современных. При аналитическом изучении рассматриваются разные системы движителей и установлены теоретические соотношения между параметрами сопла. При проектировании водозаборника учитывается посадка кормы, которая влияет на различные параметры водомётотв. В статье сделан обзор судов с водомётотвами с 17-го века до настоящего времени и приводятся примеры современных катамаранов с водомётотвными движителями. Эти примеры показаны в ПРИЛОЖЕНИИ.

Огромный обзорный материал по проектированию и применению водомётотвных движителей иностранных судов дают отчёты специальных комитетов конференций ИТТС. Кроме того, в этих отчётах можно найти списки литературы по всем вопросам, связанным с водомётотвными движителями и теми судами, на которых они используются.

На 24-ой Международной конференции по опытовым бассейнам ИТТС [38] специальный комитет по водомётотвам разработал рекомендации по определению характеристик винтовых водомётотвов для судов. После этого были проведены стандартные эксперименты в Испании, в двух бассейнах в Корее, в Италии, в России, в Голландии, в США и в Германии.

Самоходные эксперименты были разделены на составляющие: буксировочные испытания голого корпуса; измерения скорости на поверхности голого корпуса; разработка распределения скорости на входном отверстии водомётотва; скорость в струе; расчёт количества движения потока; полномасштабные предсказания.

Цель всех экспериментальных работ состояла в том, чтобы получить данные для повышения точности расчётных программ CFD. Изучалась возможность измерения скорости с помощью скоростемеров PIV (Particle Image Velocimetry) способом меченых частиц, а также с использованием LDV (Laser Doppler Velocimetry), т.е. с помощью лазерных скоростемеров.

Для того, чтобы получить возможность расчётного проектирования, необходимо было понять, какие требуется изучить характеристики потока. Было отмечено, что CFD самоходных судов уже могут обеспечить возможность выполнять расчёты взаимодействия корпуса - движителя - руля. Комитет отметил, что успехи развития PIV и LDV дают возможность получения большего разрешения для всех компонентов скорости. Аналогично, более доступным становится использование высокоскоростного видео и фотографии.

На 26 -ой Международной конференции опытовых бассейнов ИТТС в 2011 году комитетом по движителям сделан обзор работ, связанных с разработкой теории и практических расчётов водомётотвных движителей. В нескольких статьях С.Бревтона и др. [26] были исследованы и доложены исследования возможности RANS и FLUENT как инструментов анализа проектирования многоступенчатых водомётотвов. Изучение включа-

ет два набора – один с ротором, с валом и обшивкой, а второй с ротором и статором. Результаты сравнивались с данными эксперимента. М.Хедер [33] описал влияние разных характеристик работы большого водомётотва.

Д.Левис и др. [35] описали разработку и проверку компактной системы водомётотвного движителя и показали успехи CFD для проектирования водомётотва насосного типа. Описали процесс проверки характеристик, кавитацию насоса и буксировочные испытания самоходных моделей для определения взаимодействия между корпусом и водозаборником водомётотва. Н. Боултен и др. [28] представили разработку аксиального насоса. Разработка была экспериментальной и численной при их хорошем согласовании. Сделано сравнение аксиального насоса с насосом смешанного типа, которое показало значительную редукцию размеров установки и улучшение кавитации.

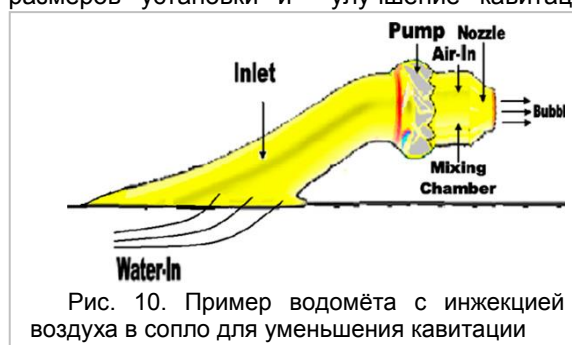


Рис. 10. Пример водомётотва с инъекцией воздуха в сопло для уменьшения кавитации

М.Зангенех и др. [45] разработали методологию для проектирования насосных водомётотвов по многим критериям. Они дали метод для 3D проектирования насосов.

Несколько исследований было выполнено по кавитации водомётотвов. Исследовался также пограничный слой водозаборника. П.Брандер и др. [24] представили результаты экспериментального исследования потока в водозаборнике водомётотва. Испытания проводились в кавитационной трубе. С.Сан и др. [40], [41] представили метод расчёта вязкого-невязкого взаимодействия внутри насосного водомётотва между ротором и статором.

С.Лю [36] и др. использовали CFD для определения гидродинамики водомётотва с кавитацией и без кавитации.

Влияние инъекции воздуха в струю (рис. 10) и соответствующие расчёты представили Дж. Цай и др. [42]. Результаты показали, что упор двухфазного сопла возрастает, благодаря инъекции сжатого воздуха. А.Гани и др. [31] представили результаты исследования работы водомётотвов и показали возрастание упора водомётотва в диапазоне 15 - 30% из-за инъекции воздушных пузырей. Например работа [43] по инъекции на Симпозиуме по гидродинамике в 2012 г.

Через 3 года в 2014 году состоялась очередная Международная конференция опытовых бассейнов ИТТС. Но она была полностью посвящена определению сопротивления воды движению судов, и на ней не рассматривались движители.

Особое внимание уделяется водомётотвам, используемым в качестве управляющего органа [23],[25], (рис.11)

На симпозиумах по гидродинамике бывает не так много докладов по водомётным движителям. Обычно рассматриваются работы по изучению турбулентности струи возле свободной поверхности [21], по кавитации [29], [30], [44], и др., по моделированию водомётов [37], [46] и т.п.

Потребность в быстрых перевозках



Рис. 11. Вид конструкции водомёта для управления судном

автомобилей и других больших грузов привела к использованию катамаранов, трёхкорпусных



Рис. 12. Первый «рассекающий волны» пассажирский катамаран « Spirit of Victory»

и даже пятикорпусных судов. На них применяются водомётные движители. Интересен такой тип как «рассекающие волны» катамараны [34] (рис 12). Они характеризуется особой формой несущих корпусов. При движении на взволнованном море в контакт с волнами входят только острые и разнесенные на большую ширину корпуса, которые пронзают гребни, не испытывая значительных ударных перегрузок. На них применяются водомётные движители.

Интерес представляют водомёты, которые располагаются под днищем судна (рис. 13). Пример такого расположения описан в работе [32], а пример показан на рис. 13.

Хороший обзор иностранных судов с необычными водомётными движителями (до 2000 года) можно найти в журнале «Катера и яхты» за 1999 год [16].

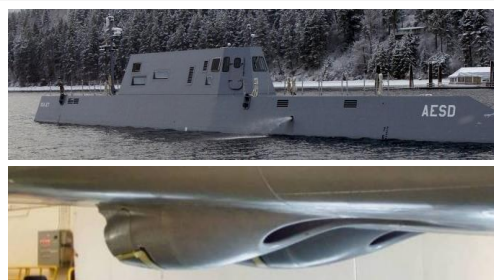


Рис. 13. Пример расположения водомёта под днищем судна

## Литература

1. Абдулин, А.Я., Месропян, А.В. Расчёт характеристик водомётных движителей глиссирующих катеров.- Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение», 2014.-14, (1), 41-51.
2. Алферьев М.Я. Судовые движители. М., Речиздат. 1947, 267 с.
3. В.Ф.Бавин, В.И. Зайков, В.Г. Павленко, Л.Б. Сандлер.- Ходкость и управляемость судов- под ред В.Г.Павленко,- М.; - Транспорт.- 1991 г.- 397 с.
4. Басин А. М. и Анфимов В.Н. Гидродинамика судна. Л., «Речной транспорт», 1961, 684 с.
5. Басин А.М. Ходкость и управляемость судна. М., «Транспорт», 1964, 476 с.
6. Басин А.М., Френкель М.И. Практический расчёт водомётного движителя быстроходного судна. Труды Ленинградского института водного транспорта.-92, 1966.- с. 8-19.
7. Басин А. М. и Медведев С. П. Расчет движительного комплекса водометного судна по результатам испытания моделей.— «Речной транспорт», 1959, № 11.
8. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчёт гребных винтов. Судпромгиз.- 1963.
9. Белинский В.Г., Чёрный Н.М. Ходкость и управляемость водомётных судов.- Киев, «Наукова думка»- 1986, 160 с.
10. Войнаровский Ю.М. Как рассчитать оптимальный водомёт.- «Катера и яхты», 1986 г. № 1 (119), с. 94 – 100
11. Войнаровский Ю.М. Параметрическая диаграмма водомётного движителя при максимальном КПД струи, Катера и яхты, 2003, 185.- с. 72-76.
12. Жуковский Н.Е. К теории судов, приводимых в движение силой реакции вытекающей воды. Полн. Собр. Соч. т.IV 1937.
13. Источник: <http://korabley.net>
14. Коновалов И.М., Литвинов А.А. Водомётный движитель. Труды академии речного транспорта.- 1953.- вып.2.-Изд. М.-Л. Изд. водного транспорта. - С. 75- 106.
15. Кoryтов Н. Водомётные движители быстроходных судов.- «Катера и яхты».- 1990, № 148. – с. 36 – 40.
16. Кoryтов Н. Скоростные суда с необычными водомётными установками.- «Катера и яхты», 1999, № 167.- с.38-42.
17. Куликов С.В., Храбкин М.Ф. Водомётные движители.- Л., Судостроение.- 1980, 312 с.
18. Мавлюдов М.А., Русецкий А.А, Садовников Ю.М., Фишер Э.А. Движители быстроходных судов. Л., Судостроение.- 1973, 240 с.
19. Папир А.Н. Водомётные движители малых судов.-Л., Судостроение,- 1970, 254 с.
20. Русецкий А.А., Жученко М.М., Дубровин О.В., Судовые движители.- Л.: Судостроение, 1971; 200 с.
21. Anthony D., Willmarth W., Madnia K., Bernal L. (1991). Turbulence Measurements in a Submerged Jet Near a Free Surface.- 22. 18 Symposium on Naval Hydrodynamics
23. Bijlard M., Bulten N. (2015). RANS simulations of cavitating azimuthing thrusters.- Fourth International Symposium on Marine Propulsors.- smp'15, Austin, Texas, USA.
24. Brander P.A., Walker G/J/ (2007). An experimental investigation into the performance of a flush water-jet inlet.- Journal of the Ship Research. 51. 1-21.
25. Borrett D., Birkinshaw A. (2007). Use of Main Drive Waterjets as Azimuth Thrusters.-Dynamic Positioning Conference.
26. Brewton S., Gowing S., Gorski J. (2006). Performance Prediction of a Waterjet Rotor Stator Combination using Rans.-26<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics Calculations, Rome, Italy.
27. Bulten, N. W. H. (2006). Numerical analysis of a waterjet propulsion system - Eindhoven: Technische Universiteit. Eindhoven DOI: 10.6100/IR614907.
28. Bulten N.W.H., van Esch B.P.M. (2007). Fully Transient CFD Analysis of Waterjet Pumps.- Marine Technology. 44 (3).. 185-193.
29. Chang S.-H., Kinnas S.A. (2012). Numerical Simulation of Wetted and Cavitating Flows inside Water-jets.- 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden.
30. David Tan D., Miorini R.L., Katz J., Keller J. (2012). Cavitation Phenomena within the Rotor Blade Passage of an Axial Waterjet Pump.- 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden.
31. Gany A., Shemer A., Gofer A., Har-Lev D., (2008). Testing Air-Augmented Waterjet Propulsion, Proc. International Conference on Waterjet Propulsion V, London, UK.
32. Giles W., Dinham-Peren T., Amaratunga S., Vrijdag A., Partridge R. (2010). The Advanced WaterJet: Propulsor Performance and Effect on Ship Design.- Paper presented at the IMAREST's 10<sup>th</sup> International Naval Engineering Conference and Exhibition entitled 'The Affordable Future Fleet; in Way.
33. Heder M. (2009). Very Large Waterjet with Adjustable Tip Clearance.- 'SMP09', Trondheim, Norway.
34. Kamal I.M., Zürcher K., Bose N., Binns J., Chai S., Davidson G. (2015). Powering for Medium Speed Wave-Piercing Catamarans comparing Waterjet and Screw Propeller Performance using Model Testing.- Fourth International Symposium Marine Propulsion 'smp'15, Austin. Texas, USA.
35. Lavis D.R., Forstell B.G., Purnell J.g. (2007). Compact Waterjet for High-Speed Ships.- Journal of Ship and Off-shore Structure.-1.2, Is. 2, 115-125.
36. Liu C., Wang., Zhang Z. (2008). Numerical Simulation and Analysis of cavitation performance of Waterjet.- International Conference on Waterjet propulsion V, London, UK.
37. Peri D., M. Tahara K. Y., Wilson W, Miozzi M., Campana E.F., Stern F. (2012). Simulation Based Design with Variable Physics Modeling and Experimental Verification of a Waterjet Propelled Catamaran.- 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden.
38. Proc. Of 25<sup>th</sup> International Towing Tank Conference . (2008). vol. I.-Fukuoka, Japan .

39. Rohman J. (2013). Application and analysis of marine water jet propulsion.- Intern. Conf. on Mechanical, Industrial and Materials Engineering .-( ICMIME2013).- RUET, RUET.-Rajshahi, Bangladesh.- paper ID: FM-01.
40. Sun C., Wang Y., Li Z. (2008). Research on Hydrodynamic Performance of Hybrid Propulsion System.- Int. Conference on Waterjet Propulsion V, London, UK.
41. Sun H., Kannas S.A. (2008). Performance prediction of cavitating water-jet propulsor using a viscous- inviscid interactive method.- Trans. SNAME, 116.
42. Tsai J., Tse C., Wang S., Yeh D. (2005). Experimental Study on the Hydrodynamic Performance of a Two Phase Nozzle for Waterjet Propulsion System.-, St-Petersburg, Russia, FAST2005.
43. Wu X., Singh S., Choi J.-K., Chahine G. L. (2012). Waterjet Thrust Augmentation using High Void Fraction Air Injection.- 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden.
44. Wu H., Soranna F., Michael T., Katz J., Jessup S. (2008). Cavitation Visualizes the Flow Structure in the Tip Region of a Waterjet Pump Rotor Blade.- 27<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden. p.1013.
45. Zangeneh M., Daneshkhah K., DaCosta B. (2008). A Multi-Objective Automatic Optimization Strategy for design of Waterjet Pumps.-Int. Conf. on Waterjet Propulsion - London, UK.
46. Zurcher K., Bose N., Binns T. G., Davidson G. (2013). Design and commissioning tests for waterjet self-propulsion testing of a medium-speed catamaran ferry using a single demihull, Proceedings of the Third International Symposium on Marine Propulsors.- Launceston, Tasmania, Australia. 97-103.

### References

1. Abdulin, A.Ja., Mesropjan, A.V. Raschjot karakteristik vodomjotnyh dvizhitelej glissirujushhih katerov.- Vestnik JuUrGU. Serija «Mashinostroenie», 2014.-14, (1), 41-51.
2. Alfer'ev M.Ja. Sudovye dvizhiteli. M., Rechizdat. 1947, 267 s.
3. V.F.Bavin, V.I. Zajkov, V.G. Pavlenko, L.B. Sandler.- Hodkost' i upravljaemost' sudov- pod red V.G.Pavlenko,- M.; - Transport.- 1991 g.- 397 s.
4. Basin A. M. i Anfimov V.N. Gidrodinamika sudna. L., «Rechnoj transport», 1961, 684 s.
5. Basin A.M. Hodkost' i upravljaemost' sudna. M., «Transport», 1964, 476 s.
6. Basin A.M., Frenkel' M.I. Prakticheskij raschjot vodomjotnogo dvizhitelja bystrohodnogo sudna. Trudy Leningradskogo instituta vodnogo transporta.-92, 1966.- s. 8-19.
7. Basin A. M. i Medvedev S. P. Raschet dvizhitel'nogo kompleksa vodometnogo sudna po rezul'tatam ispytani-ja modelej.— «Rechnoj transport», 1959, № 11.
8. Basin A.M., Miniovich I.Ja. Teorija i raschjot grebnyh vintov. Sudpromgiz.- 1963.
9. Belinskij V.G., Chjornyj N.M. Hodkost' i upravljaemost' vodomjotnyh sudov.- Kiev, «Naukova dumka»- 1986, 160 s.
10. Vojnarovskij Ju.M. Kak rasschitat' optimal'nyj vodomjot.- «Katera i jahty», 1986 g. № 1 (119), s. 94 – 100
11. Vojnarovskij Ju.M. Parametricheskaja diagramma vodomjotnogo dvizhitelja pri maksimal'nom KPD strui, Katera i jahty, 2003, 185.- s. 72-76.
12. Zhukovskij N.E. K teorii sudov, privodimyh v dvizhenie siloj reakcii vytekajushhej vody. Poln. Sobr. Soch. t.IV 1937.
13. Istochnik: <http://korabley.net>
14. Konovalov I.M., Litvinov A.A. Vodomjotnyj dvizhitel'. Trudy akademii rechnogo transporta.- 1953.-vyp.2.-Izd. M.-L. Izd. vodnogo transporta. - S. 75- 106.
15. Korytov. N. Vodomjotnye dvizhiteli bystrohodnyh sudov.- «Katera i jahty».- 1990, № 148. – s. 36 – 40.
16. Korytov N. Skorostnye suda s neobychnymi vodomjotnymi ustanovkami.- «Katera i jahty», 1999, № 167.-s.38-42.
17. Kulikov S.V., Hramkin M.F. Vodomjotnye dvizhiteli.- L., Sudostroenie.- 1980, 312 s.
18. Mavljudov M.A., Ruseckij A.A, Sadovnikov Ju.M., Fisher Je.A. Dvizhiteli bystrohodnyh sudov. L., S Sudostroenie.- 1973, 240 s.
19. Papir A.N. Vodomjotnye dvizhiteli malyh sudov.-L., Sudostroenie,- 1970, 254 s.
20. Ruseckij A.A., Zhuchenko M.M., Dubrovin O.V., Sudovye dvizhiteli.- L.: Sudostroenie, 1971; 200 s.
21. Anthony D., Willmarth W., Madnia K., Bernal L. (1991). Turbulence Measurements in a Submerged Jet Near a Free Surface.- 22. 18 Symposium on Naval Hydrodynamics
23. Bijlard M., Bulten N. (2015). RANS simulations of cavitating azimuthing thrusters.- Fourth International Symposium on Marine Propulsors.- smp'15, Austin, Texas, USA.
24. Brander P.A., Walker G/J/ (2007). An experimental investigation into the performance of a flush water-jet inlet.- Journal of the Ship Research. 51. 1-21.
25. Borrett D., Birkinshaw A. (2007). Use of Main Drive Waterjets as Azimuth Thrusters.-Dynamic Positioning Conference.
26. Brewton S., Gowing S., Gorski J. (2006). Performance Prediction of a Waterjet Rotor Stator Combination using Rans.-26<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics Calculations, Rome, Italy.
27. Bulten, N. W. H. (2006). Numerical analysis of a waterjet propulsion system - Eindhoven: Technische Universiteit. Eindhoven DOI: 10.6100/IR614907.
28. Bulten N.W.H., van Esch B.P.M. (2007). Fully Transient CFD Analysis of Waterjet Pumps.- Marine Technology. 44 (3), 185-193.
29. Chang S.-H., Kinnas S.A. (2012). Numerical Simulation of Wetted and Cavitating Flows inside Water-jets.- 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden.
30. David Tan D., Miorini R.L., Katz J., Keller J. (2012). Cavitation Phenomena within the Rotor Blade Passage of an Axial Waterjet Pump.- 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden.
31. Gany A., Shemer A., Gofer A., Har-Lev D., (2008). Testing Air-Augmented Waterjet Propulsion, Proc. International Conference on Waterjet Propulsion V, London, UK.

32. Giles W., Dinham-Peren T., Amaratunga S., Vrijdag A., Partridge R. (2010). The Advanced WaterJet: Propulsor Performance and Effect on Ship Design.- Paper presented at the IMAREST's 10<sup>th</sup> International Naval Engineering Conference and Exhibition entitled 'The Affordable Future Fleet; in Way.
33. Heder M. (2009). Very Large Waterjet with Adjustable Tip Clearance.- 'SMP09', Trondheim, Norway.
34. Kamal I.M., Zürcher K., Bose N., Binns J., Chai S., Davidson G. (2015). Powering for Medium Speed Wave-Piercing Catamarans comparing Waterjet and Screw Propeller Performance using Model Testing.- Fourth International Symposium Marine Propulsion 'smp'15, Austin, Texas, USA.
35. Lavis D.R., Forstell B.G., Purnell J.g. (2007). Compact Waterjet for High-Speed Ships.- Journal of Ship and Off-shore Structure.-1.2, Is. 2, 115-125.
36. Liu C., Wang., Zhang Z. (2008). Numerical Simulation and Analysis of cavitation performance of Waterjet.- International Conference on Waterjet propulsion V, London, UK.
37. Peri D., M. Tahara K. Y., Wilson W, Miozzi M., Campana E.F., Stern F. (2012). Simulation Based Design with Variable Physics Modeling and Experimental Verification of a Waterjet Propelled Catamaran.- 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden.
38. Proc. Of 25<sup>th</sup> International Towing Tank Conference . (2008). vol. I.-Fukuoka, Japan .
39. Rohman J. (2013). Application and analysis of marine water jet propulsion.- Intern. Conf. on Mechanical, Industrial and Materials Engineering .-( ICMIME2013).- RUET, RUET.-Rajshahi, Bangladesh.- paper ID: FM-01.
40. Sun C., Wang Y., Li Z. (2008). Research on Hydrodynamic Performance of Hybrid Propulsion System.- Int. Conference on Waterjet Propulsion V, London, UK.
41. Sun H., Kannas S.A. (2008). Performance prediction of cavitating water-jet propulsor using a viscous- inviscid interactive method.- Trans. SNAME, 116.
42. Tsai J., Tse C., Wang S., Yeh D. (2005). Experimental; Study on the Hydrodynamic Performance of a Two Phase Nozzle for Waterjet Propulsion System.-, St-Petersburg, Russia, FAST2005.
43. Wu X., Singh S., Choi J.-K., Chahine G. L. (2012). Waterjet Thrust Augmentation using High Void Fraction Air Injection.- 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden.
44. Wu H., Soranna F., Michael T., Katz J., Jessup S. (2008). Cavitation Visualizes the Flow Structure in the Tip Region of a Waterjet Pump Rotor Blade.- 27<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics.- Gothenburg, Sweden. p.1013.
45. Zangeneh M., Daneshkhah K., DaCosta B. (2008). A Multi-Objective Automatic Optimization Strategy for design of Waterjet Pumps.-Int. Conf. on Waterjet Propulsion .- London, UK.
46. Zurcher K., Bose N., Binns T. G., Davidson G. (2013). Design and commissioning tests for waterjet self-propulsion testing of a medium-speed catamaran ferry using a single demihull, Proceedings of the Third International Symposium on Marine Propulsors.- Launceston, Tasmania, Australia. 97-103.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Некоторые примеры реальных судов с водомётными движителями



Рис. 14. Судно SES-200. L=48,8 м, В=13,1м, D=150т. до 205т,  $U = 25$  узл.



Рис. 15. Военное судно Tukumari (1958 -72 гг) L= 40м, В=8,6 м,  $U = 40$ узл, два водомёта по 800л.с.



Рис. 16. Катамаран T-Craft L= 80,7 м, В= 20,6 м с корпусами В= 5м, D=1792 т,  $U = 30$  узл..



Рис. 17. Пассажирское судно на подводных крыльях (модель 929-100) L= 27,43м, В =9,15м, ldt две турбины с двумя насосными водомётами



Рис. 18.. Большое красивое судно L=106,5м, В= 23,8 м, D = 800т,  $U = 40$  узл, 4 водомёта КаМеВа 125 S11, 4 главных двигателя.



Рис. 19. Высокоскоростной пассажирский катамаран L= 52,4 м, В=13м,  $U = 40$  узл, 4 двигателя, 4 водомёта КаМеВа S11



Рис. 20. Спортивное судно  $L = 20,11$  м,  $B = 5,2$  м,  
 $D = 35$  т два двигателя и два водомёта,  $U = 28$  узл

Рис. 21. Тримаран  $L=127$  м,  $B=31,6$  м,  $U = 40$  узл,  
 $D = 210$  т. 4 водомёта



Рис 22. Скоростной пентамаран  $L=290$  м,  $B= 45$  м  
 $D =6500$  т,  $U = 41,5$  узла.

УДК 539.4

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНСТРУКЦИЙ С ВОДО-ВОЗДУШНОЙ СРЕДОЙ

**Дмитрий Александрович Пономарев**

аспирант, стажер-исследователь научно-исследовательской части  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

### Аннотация

В настоящей работе анализируются современные методы решения задачи взаимодействия конструкций с водо-воздушной средой. Сформулирован общий вид фундаментальной системы дифференциальных уравнений для связанной задачи взаимодействия конструкции с водо-воздушной средой, которая в свою очередь состоит из двух подсистем уравнений для описания поведения конструкции и жидкости. Приведены модели аналитических решений для оценки избыточного гидродинамического давления, возникающего при погружении конструкции. Рассмотрено численное моделирование на базе метода конечных элементов с алгоритмом связывания сеток Лагранжа и Эйлера.

Выполнен анализ погружения недеформируемой трехгранной призмы в покоящуюся жидкость с начальной скоростью в объемной постановке. Получена обширная информация по кинематическим и силовым параметрам взаимодействия. В результате численного моделирования получена оценка величины смоченной поверхности с учетом подъема жидкости и образования брызговых струй с отрывом от поверхности тела. Также проанализирована история изменения гидродинамических давлений в процессе погружения. Результаты численного моделирования и аналитических моделей сопоставляются с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** гидроупругость, слеминг, метод конечных элементов, гидродинамические давления, уравнения механики сплошной среды, взаимодействие конструкция-жидкость, ПЛЭ

## MODERN METHODS FOR SOLVING THE PROBLEM OF INTERACTION OF STRUCTURES WITH WATER-AIR MEDIUM

**D.Ponomarev**

Graduate student, engineer-researcher of Research part  
State Marine Technical University. 3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190121 Russia  
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

### Abstract

In this paper, modern methods for solving the problem of interaction of structures with a water-air medium are considered. A general form of the fundamental system of differential equations for the coupled problem of fluid structure interaction is formulated, which consists of two subsystems of equations for describing the behavior of a structure and a fluid. Analytical models of the estimation of interaction parameters and impact pressures are presented. Numerical simulation based on the finite element method with the Lagrange-Euler coupling algorithm is considered. Comparison of experimental data, the results of numerical modeling and analytical solutions are performed.

An analysis of entry an undeformed trihedral prism into a resting liquid with an initial velocity in 3D formulation is carried out. Extensive information on the kinematic and force parameters of the interaction are obtained. As a result of numerical simulation, an estimate of the wetted surface taking into account of fluid lifting and the formation of spray jets with separation from the surface of the body are obtained. A history of changes in hydrodynamic pressures during the impact process is also analyzed. The results of numerical modeling and analytical models are compared with experimental data.

**Keywords:** hydroelasticity, slamming, finite element method, hydrodynamic pressures, continuum mechanics equation, fluid-structure interaction, ALE

### Введение

Исследование движения деформируемых конструкций произвольной геометрии при взаимодействии с водо-воздушной средой является актуальным вопросом в разделе механики сплошной среды, называемым гидроупругостью. Она представляет собой связанную задачу, в которой процесс ударного взаимодействия включает нахождение нестационарной зоны контакта конструкции с жидкостью, оценку гидродинамических нагрузок, расчет напряженно-деформируемого состояния и параметров движения объекта. Описывается задача гидроупругости в общем случае связанной системой дифференциальных уравнений динамики сплошной среды для жидкости и конструкции.

Исторически сложилось, что при описании движения сплошной среды используются подходы Лагранжа и Эйлера.

Сплошная среда представляет собой непрерывную совокупность материальных точек. Движение сплошной среды или материальных точек всегда определяется по отношению к некоторой системе отсчета – системе координат.

В подходе Лагранжа система координат связывается с материальной точкой в начальный момент времени и исследование движения происходит вдоль ее траектории. С другой стороны, в подходе Эйлера рассматривается не история движения индивидуальных точек сплошной среды, а то, что происходит с течением времени в фиксированной точке пространства. Задание движения сплошной среды с помощью подхода Лагранжа и Эйлера в механическом отношении эквивалентны друг другу, т.е. можно выполнить переход от переменных Лагранжа к переменным Эйлера и наоборот. Стоит отметить, что несмотря на эквивалентность двух подходов, в подходе Лагранжа изучается изменение формы частицы, поэтому главным объектом является тензор конечной деформации и тензор относительного перемещения на конечном интервале времени, а в подходе Эйлера – тензор скоростей деформаций и тензор скоростей относительной перемещения.

#### 1. Уравнения динамики сплошной среды

К трем фундаментальным законам механики относятся закон сохранения масс, закон изменения количества движения и закон сохранения энергии. Эти законы в динамике сплошной среды приводят к построению пяти основным независимым уравнениям: трех общих уравнений движения, уравнения неразрывности (уравнение сплошности) и термодинамического уравнения энергии (первое начало термодинамики). Систему фундаментальных уравнений в любом случае требуется доопределить таким образом, чтобы количество неизвестных

функций было равно числу дифференциальных уравнений. Для доопределения системы, ее замыкания и возможного упрощения приходится вводить ряд допущений и гипотез. Анализ показывает, что в ней отсутствуют соотношения, учитывающие реакцию среды на процесс ее деформирования. Эти соотношения должны показывать, какие внутренние напряжения возникают в ответ на ту или иную деформацию, и условия такого деформирования.

Такого рода соотношения зависят от принятой модели сплошной среды. Основными моделями в механике являются: твердое тело, абсолютно упругое тело Гука, идеальная и вязкая жидкости Ньютона, а также модели, обладающие вязкоупругими (пластическими) свойствами. Ниже ограничимся рассмотрением упругого тела, для которого справедлив закон Гука – линейная связь тензора напряжений и тензора деформаций. А для жидкости используем обобщенный закон вязкого трения Ньютона, который связывает тензор напряжений с тензором скоростей деформаций.

В замкнутой системе дифференциальных уравнений, одним из аргументов является время. Поэтому необходимо задать начальные условия: значения всех параметров среды и тела в начальный момент, от которого можно производить отсчет времени. Начальные условия имеют вид функций, заданных во всех точках описываемой области.

Наличие производных по пространственным координатам требует знания граничных условий: значений всех параметров среды на ее границе (на стенках сосуда, на свободной поверхности, на поверхности обтекаемых тел). Корректность задания граничных условий определяется математическими требованиями и здесь не рассматривается. В случае неустановившегося движения граничные условия имеют вид функций не только от координат граничных точек, но и от времени.

Таким образом общий вид фундаментальной системы дифференциальных уравнений для связанной задачи взаимодействия конструкции с водо-воздушной средой, которая в свою очередь состоит из двух подсистем уравнений для описания поведения конструкции и жидкости можно представить в виде [17,19]:



$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_f \bar{v}_f) &= 0 \\
 \frac{d(\rho_f \bar{v}_f)}{dt} &= \rho_f \bar{F}_f + \operatorname{div}(\bar{\sigma}_f) \\
 \frac{d(\rho_f u_f)}{dt} &= \bar{\sigma}_f \operatorname{div}(\bar{v}_f) + e_f + \operatorname{div}(\gamma_f) \\
 \sigma_{f\,ij} &= \sigma_{f\,ij}(\varepsilon_{f\,ij}, \dot{\varepsilon}_{f\,ij}, \rho_f, T_f) \\
 p_f &= \Psi(\rho_f)
 \end{aligned} \right\} (1.1)$$
  

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d(\rho_s \bar{v}_s)}{dt} &= \rho_s \bar{F}_s + \operatorname{div}(\bar{\sigma}_s) \\
 \frac{d(\rho_s u_s)}{dt} &= \bar{\sigma}_s \operatorname{div}(\bar{v}_s) + e_s + \operatorname{div}(\gamma_s) \\
 \sigma_{s\,ij} &= \sigma_{s\,ij}(\varepsilon_{s\,ij}, \dot{\varepsilon}_{s\,ij}, \rho_s, T_s)
 \end{aligned} \right\}$$

В уравнениях использованы индексы  $f$  и  $s$  для жидкости и конструкции соответственно. Отметим, что во второй подсистеме уравнений отсутствует уравнение неразрывности. Это справедливо в предположении, что деформации малы, в частности изменение плотности также мало. В общем случае  $\rho = \rho_0 + \rho'$ , где  $\rho' \ll \rho_0$ . С точностью до малых первого порядка можно считать  $\rho' \approx 0$ . Уравнение неразрывности в теории упругости служит для определения  $\rho'$ .

Связь между системами дифференциальных уравнений обеспечивается тем, что внешние силы для конструкции определяются из уравнений, описывающих поведение жидкости, для которой в свою очередь граничные условия на свободной и смоченной поверхности задаются исходя из отыскания перемещений конструкции.

В общем случае решение системы (1.1) строится следующим образом. Для того, чтобы получить непрерывное решение, необходимо определить зону контактного взаимодействия (поверхность контакта) конструкции и жидкости, которая является смоченной поверхностью и зависит от времени  $\Gamma_c(t)$  и определяется как пересечение свободной поверхности жидкости  $\Gamma_f(t)$  с контуром конструкции  $\Gamma_s(t)$ . В свою очередь граница конструкции определяется как сумма перемещений как жесткого целого и перемещений в результате деформирования:  $\Gamma_s(t) = w_R(t) + w_{def}(t)$ . После нахождения поверхности контакта  $\Gamma_c(t)|_{t=t_k}$  в момент времени  $k$  решается гидродинамическая задача (первая подсистема (1.1)) и вычисляются значения гидродинамических давлений. Найденные давления на

$\Gamma_c(t)|_{t=t_k}$  используются как  $\Gamma_s(t)|_{t=t_k}$ . После этого можно приступить к решению второй подсистемы (1.1), в результате чего получаем  $\Gamma_s(t)|_{t=t_k}$ . Далее процесс продолжается, отыскивается новое положение смоченной поверхности и так далее. Несмотря на достаточно простые рассуждения, получить аналитическое решение для системы уравнений (1.1) не представляется возможным, а использование численных процедур встречается заметные трудности.

Поэтому в системе уравнений, описывающих поведение жидкости, для приведения в соответствие количества неизвестных аргументов и числа разрешающих уравнений необходимо вводить различные допущения.

В случае отсутствия в системе притока или оттока тепла в использовании уравнения сохранения энергии нет необходимости.

Предполагая, что жидкость является несжимаемой средой, т.е.  $\rho = const$ , уравнение сохранения массы примет вид:

$$\rho_f \operatorname{div}(\bar{v}_f) = 0 \text{ или } \operatorname{div}(\bar{v}_f) = 0 \quad (1.2)$$

В свою очередь сжимаемость жидкости проявляется в малом изменении ее плотности, которое можно охарактеризовать величиной относительно приращения плотности [3]:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{p}{\rho_0 c_0^2} \right) \quad (1.3)$$

В случае несжимаемой или слабосжимаемой жидкости  $\frac{p}{\rho_0 c_0^2}$  мало по сравнению с единицей, что также приводит к линеаризации уравнений движения.

Еще одним важным допущением является так называемая модель идеальной жидкости – жидкость, в которой отсутствует внутреннее трение, т.е. нет касательных напряжений между двумя соседними слоями жидкости.

Моделью идеальной жидкости пользуются при теоретическом рассмотрении задач, в которых вязкость не является определяющим фактором и ею можно пренебречь. В частности, такая идеализация допустима во многих случаях течения, рассматриваемых гидроаэромеханикой, и даёт хорошее описание реальных течений жидкостей и газов на достаточном удалении от омываемых твёрдых поверхностей и поверхностей раздела с неподвижной средой. Математическое описание течений

идеальных жидкостей позволяет найти теоретическое решение ряда задач о движении жидкостей.

В гидромеханике широко используется понятия потенциала скорости  $\phi$ , который представляет собой  $\vec{v}_f = grad(\phi)$ , что позволяет из (1.2) получить:

$$div(grad(\phi)) = \Delta\phi = 0 \tag{1.4}$$

Уравнение (1.4) является уравнением Лапласа, которое описывает потенциальное (безвихревое) течение жидкости, для которого для заданных граничных условий получить аналитическое решение не составляет труда.

Таким образом, предположение о том, что при взаимодействии конструкции с водо-воздушной средой течение несжимаемой жидкости является потенциальным легло в основу построения аналитических методов решения задачи гидроупругости.

## 2. Аналитические методы

При рассмотрении задачи взаимодействия конструкции с жидкостью с точки зрения теоретических подходов выделились два основных направления исследования – теория удара конструкции о поверхность жидкости и теория непрерывного погружения.

Характерной особенностью теории удара является гипотеза о скачкообразном изменении скорости проникающего тела за бесконечно малый промежуток времени. Предполагается, что тело и жидкость находится в покое, а вместо сил рассматриваются импульсы. Тело приобретает заданную скорость в результате внезапного приложения внешнего импульса. При решении ударных задач вводится понятие присоединенной массы жидкости, которая, будучи фиктивной массой, характеризует инерцию окружающей среды, приводимой телом в движение.

Несмотря на то, что с применением приближенных теорий удара о воду решено большое число задач, полученные результаты имеют количественное расхождение с данными модельных экспериментов. Не учет возмущения свободной поверхности приводит к отличию кинетической энергии возмущенной жидкости, определяемой вводом присоединенных масс, от истинных значений. Решения общей задачи сводится к последовательности подзадач ударов плавающего тела с переменной осадкой, что ведет к утрате истории движения жидкости. Данный факт приводит к тому, что необходимо рассматривать совместное движение системы тело-жидкость, при котором происходит учет изменения поля возмущения в жидкости и форма границ тела в каждый момент времени.

Первое аналитическое решение динамики погружения твердого тела в жидкость было выполнено Ф. Карманом [4], который получил выражение для оценки максимальной силы, действующей на тело. Он рассматривал движение абсолютно жесткого клина единичной толщины с начальной скоростью  $v_0$ , массой  $M$  и углом килеватости  $\beta$ .

Из уравнения сохранения количества движения вытекает

$$v = \frac{v_0}{1 + \mu/M} \tag{2.1}$$

где  $\mu = \mu(t) = 0,5\pi\rho c(t)^2$  – присоединенные массы жидкости.

Ограниченность теории Ф. Кармана связана с невозможностью учета нелинейной свободную поверхность воды - подъем вытесненной жидкости вдоль щек клина, брызгообразование.

В дальнейшем, Г. Вагнер модифицировал теорию Ф. Кармана, путем учета эффекта встречного движения жидкости и образование брызговой струи.

Г. Вагнер предположил, что для тел с относительно малым углом килеватости, относительное движение жидкости при очень быстром погружении тела совпадает с движением жидкости при обтекании непрерывно расширяющейся плоской пластины, рис. 1, что позволяет использовать выражение потенциала скоростей для потока идеальной жидкости, обтекающего бесконечно длинную пластину шириной  $2c$ . [3,18]:

Также, в отличии от теории Ф. Кармана, учитывается увеличение смоченной поверхности тела за счет встречного движения жидкости – образование брызговой струи.

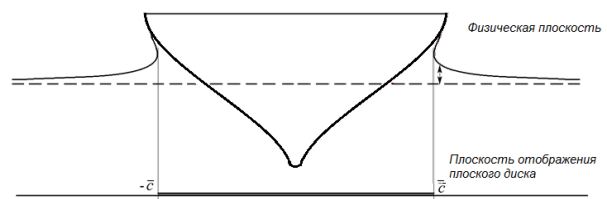


Рис.1. Схема аппроксимации потока жидкости.

Давление, действующее на тело, отыскивается из уравнения Бернулли для идеальной невязкой жидкости [20]

$$p(x, t) = \rho \frac{dv}{dt} \sqrt{c^2 - x^2} + \rho v \frac{c\dot{c}}{\sqrt{c^2 - x^2}} \tag{2.2}$$

Для прямолинейного клина может быть получено выражение для смоченной поверхности [7]:

$$c(t) = \int_0^t \frac{v}{\chi} dt = \frac{\pi}{2 \operatorname{tg}(\beta)} vt, \quad (2.3)$$

где  $\chi = \operatorname{tg}(\beta)$  – теория Ф.Кармана

$$\chi = \frac{2}{\pi} \operatorname{tg}(\beta) \text{ – теория Г.Вагнера.}$$

Таким образом соотношение между шириной смоченной поверхности для двух теорий равно  $\pi/2$ .

Теория Вагнера долгое время использовалась при оценке гидродинамических давлений на практике. Более сложные уравнения течения и более сложные граничные условия могут быть проанализированы с использованием передовых математических методов.

С другой стороны, классическая модель Вагнера не может описать некоторые важные особенности процесса взаимодействия. Огромное значение имеют нелинейные эффекты, связанные с геометрией области течения, граничными условиями и уравнением Бернулли. Вагнер представил локальный анализ нелинейного течения в окрестности зоны контакта и некоторые идеи о нелинейных эффектах, исходящих из уравнения Бернулли. Коррекция решения Вагнера с учетом нелинейных эффектов именно в этой окрестности очень важна. В работах [7,8,13] получены асимптотические модели, которые уточняют нагрузку на погружающееся тело по сравнению с исходной моделью Вагнера. К таким моделям относятся обобщенная модель Вагнера (ОМВ), оригинальная модель Логвиновича (ОМЛ) и модифицированная модель Логвиновича (ММЛ). Давление в области смоченной поверхности определяется следующим образом:

ОМВ:

$$p(x,t) = \frac{1}{2} \rho v^2 \left[ \frac{\pi}{\operatorname{tg}(\beta)} \frac{c}{\sqrt{c^2 - x^2}} - \cos^2(\beta) \left( \frac{c}{\sqrt{c^2 - x^2}} \right)^2 - \sin^2(\beta) + 2 - \pi \right] \quad (2.4)$$

ОМЛ:

$$p(x,t) = \frac{1}{2} \rho v^2 \left[ \frac{\pi}{\operatorname{tg}(\beta)} \frac{c}{\sqrt{c^2 - x^2}} - \left( \frac{c}{\sqrt{c^2 - x^2}} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

ММЛ:

$$p(x,t) = \frac{1}{2} \rho v^2 \left[ \frac{\pi}{\operatorname{tg}(\beta)} \frac{c}{\sqrt{c^2 - x^2}} - \cos^2(\beta) \left( \frac{c}{\sqrt{c^2 - x^2}} \right)^2 - \sin^2(\beta) \right] \quad (2.6)$$

Существует также важная группа полуаналитических моделей взаимодействия. Эти модели основаны на обобщенном подходе Вагнера, где упрощаются только граничные условия на свободной от жидкости поверхности. Это означает, что эти граничные условия линеаризуются и накладываются на горизонтальную линию на высоте всплеска, которая рассчитывается с использованием условия Вагнера. Применяются реальная форма тела, исходные граничные условия тела и нелинейное уравнение Бернулли. В этом подходе область потока известна в любой момент времени, если задана высота всплеска и глубина проникновения. Из-за особенности течения в точках пересечения нелинейное уравнение Бернулли дает отрицательные и неограниченные давления, близкие к этим точкам. В работе [22] предложено интегрировать гидродинамическое распределение давления только по части смачиваемой поверхности, где давление положительное.

Метод конформного отображения Шварца Кристоффеля позволил получить решение для случая переменной скорости погружения. Выражение для давлений состоит из двух частей. Первая отвечает за решение, полученная в работе [16], и вторая часть выражает различие между давлением при постоянной скорости и более общего случая переменной скорости.

$$P = P_{Mei} + \Delta P \quad (2.7)$$

$$\frac{P_{Mei}}{0.5 \rho v^2} = \frac{2\gamma}{A \operatorname{tg}(\beta)} \left[ \left( \frac{1-q^2}{q^2} \right)^\theta \int_{|q|}^1 \left( \frac{w^2}{1-w^2} \right)^\theta dw - q \right] - \left( \frac{1-q^2}{q^2} \right)^{2\theta} - 2\gamma + 1 \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta P}{0.5 \rho v^2} = \frac{2\gamma}{A \operatorname{tg}(\beta)} \left[ \sin(\beta) \int_0^q \left( \frac{w^2}{1-w^2} \right)^\theta dw - q \right] \cdot \int_0^q v(t) dt \frac{dv(t)}{dt} \frac{1}{v(t)^2} \quad (2.9)$$

$$\text{где } \theta = \frac{\pi - 2\beta}{2\pi}$$

$$A(\beta) = \cos(\beta) \int_0^1 \left( \frac{w^2}{1-w^2} \right)^\theta dw$$

$$\gamma(\beta) = A(\beta) \int_0^{\infty} \left( \int_0^p \left( \frac{w^2}{1+w^2} \right)^\theta dw + A(\beta) \right)^{-2} dp$$

Параметр  $q$  определяется из положения тела как

$$\frac{f(x)}{vt} = \frac{\gamma(\beta)}{A(\beta)} \cos(\beta) \int_0^q \left( \frac{w^2}{1-w^2} \right)^\theta dw + \gamma(\beta) \quad (2.10)$$

при  $0 \leq \frac{f(x)}{vt} \leq \gamma(\beta)$ .

### 3. Численное моделирование

#### 3.1. Описание алгоритма взаимодействия

Решение междисциплинарной задачи деформирования конструкции в жидкости выполняется в рамках метода конечных элементов с помощью совместной формулировки Произвольной Лагранжа-Эйлера (ПЛЭ). Здесь конструкция описывается Лагранжевой сеткой, а область жидкости - Эйлеровой сеткой [9-11]

Для рассматриваемой задачи гидродинамический отклик включает в себя воздействие тела на свободную поверхность жидкости. Влияние скользящего контакта, когда жидкость течет вдоль тела, существенно влияет на ударное давление. Поскольку правильное сочетание контактного взаимодействия между доменами текучей среды и клином является существенным, выбор параметров моделирования становится существенным.

Взаимодействие между сетками осуществляется через алгоритм сопряжения, использующий метод штрафов [4]. В процессе сопряжения генерируются силы, противодействующие прониканию материала ПЛЭ в Лагранжевые части. Силы противодействия прикладываются к узлам контакта жидкости и конструкции с целью предотвращения прохода узла через поверхность контакта.

Метод штрафа в Лагранжево-Эйлеровом сопряжении ведет себя как система пружин. Силы штрафа рассчитываются пропорционально глубине проникания и жесткости пружины. Один конец пружины связан с узлом конструкции или подчиненным узлом, а другой конец связан с главным узлом внутри элемента жидкости, который служит препятствием для конструкции, как показано на рис. 2. Параллельно пружине может быть введен демпфер.

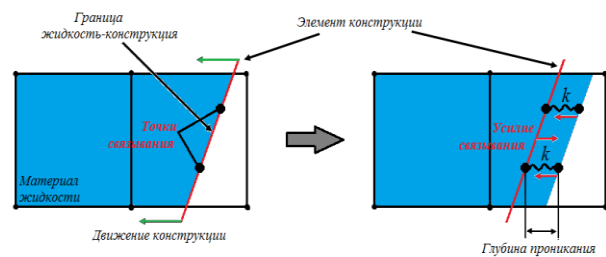


Рис. 2 Схема алгоритма сопряжения сеток Лагранжа и Эйлера

Сила сопряжения записывается в следующем виде

$$F = k \cdot d \quad (3.1)$$

где  $k$  - представляет собой жесткость пружины;  $d$  - глубина проникания.

Корректное определение значения жесткости  $k$  является дополнительной темой исследования для явных алгоритмов ударного контакта в строительной механике. Необходимо задаться такой величиной жесткости, которая уменьшит энергию на границе для того, чтобы удовлетворить общему сохранению энергии и предотвратит при этом просачивания жидкости через конструкцию.

В программном комплексе LS-Dyna [4], жесткость  $k$  вычисляется как:

$$k = \frac{p_f K A^2}{\Omega} \quad (3.2)$$

где  $K$  - модуль объемной упругости,  $\Omega$  - объем элемента,  $A$  - площадь элемента,  $p_f$  - коэффициент штрафа для контактной жесткости, которая задается пользователем. Большие значения этого коэффициента могут привести к численной неустойчивости, если не будет выполняться масштабирование шага по времени на основе критерия Куранта.

#### 3.2. Описание численной модели

Для сопоставления рассмотренных методов решения проблемы взаимодействия конструкции с жидкостью рассматривается задача проникания недеформируемого тела, представляющего собой трехгранную призму с углом килеватости  $\beta = 25^\circ$ , с начальной скоростью  $v_0 = 5.049$  м/с. Масса тела составляет 94 кг. Расчетная область с основными размерами представлена на рис.3.

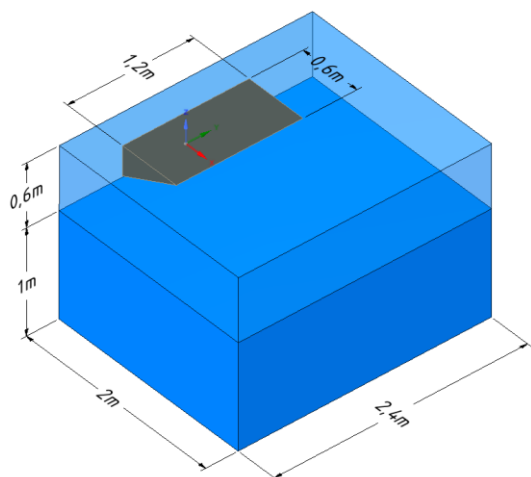


Рис. 3 Расчетная область проникания недеформируемого тела в покоящуюся жидкость (показана симметричная часть).

Тело описывается Лагранжевой сеткой с помощью оболочечных элементов Белычко-Цая, используется модель абсолютно жесткого материала. Область жидкости моделируется твердотельными элементами с формулировкой ПЛЭ с одной точкой интегрирования по объему. Для жидкости применена модель материала с уравнением состояния Мю-Грюнаизена вида:

$$p = \frac{\rho c^2 \mu \left[ 1 + \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^2}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma + a \mu) E \tag{3.3}$$

Характеристики материала приведены в табл. 1 [14]. Для возможности брызгообразования также добавлена область пустоты, для которой принята модель материала пустоты.

Таблица. 1

Характеристики материала жидкости

Наименование	Значение
Плотность	$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$
Скорость звука	$C = 1500 \text{ м/с}$
Коеф. уравнения состояния	$S_1 = 1.75, S_2 = S_3 = 0, a = 0, \gamma = 0.28, E = 0$

Значение локального пика давления на конструкцию очень чувствительно к скалярному коэффициенту штрафа  $p_f$ , используемому для вычисления силы сопряжения в модели по формуле (4.2) [4,14]. Для того, чтобы получить корреляцию для местного пика давления с аналитическими результатами, принято  $p_f$ .

Важным моментом сопряжения сеток Лагранжа и ПЛЭ является выбор минимального размера конечного элемента. С одной стороны, при очень мелкой разбивке области повышается точность вычисления, с другой стороны это приводит к значительному росту времени счета. При увеличении размера элементов для сетки ПЛЭ, возникает некорректное описание деформируемой свободной поверхности, отсутствие формирования и отрыва брызговых струй и волнообразований. С учетом сказанного принят компромиссный вариант минимального размера конечных элементов - 15 мм. Конечно-элементная модель представлена на рис. 4.

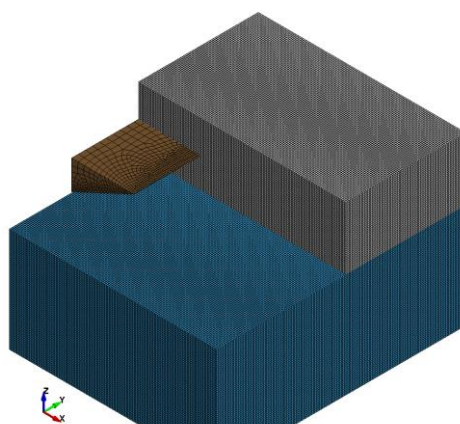


Рис. 4 Конечно-элементная модель, часть конечных элементов области пустоты не показаны

В качестве граничных условий для призмы принято ограничение перемещений по всем направлениям, кроме вертикального, вдоль оси Z. Для предотвращения отражения волн от стенок бассейна задаются граничные условия неотражения.

### 3.3. Результаты численного моделирования

В результате численного моделирования получена обширная информация о параметрах взаимодействия недеформируемого тела с водовоздушной средой.

В процессе погружения вдоль всей поверхности клина образуется брызговая струя, которая при полном проникании тела в жидкость отрывается и дальнейшего контактного взаимодействия не происходит. На рис. 5 показана деформированная свободная поверхность жидкости при времени погружения  $t = 80 \text{ мс}$ .

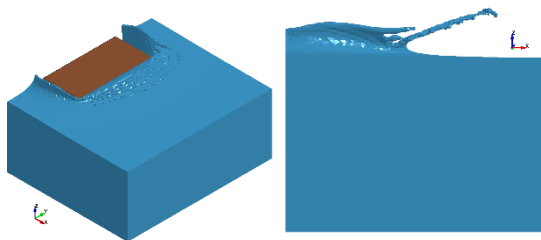


Рис. 5 Деформированная свободная поверхность жидкости при  $t = 80$  мс (вид в изометрии и вид сбоку).

Полученные результаты численного анализа позволяют проводить сопоставление не только с аналитическими решениями, но и с экспериментальными данными. В работе [21] приводятся результаты экспериментальных исследований проникания пространственного клина с заданной начальной скоростью. Экспериментальная установка представлена на рис. 6.

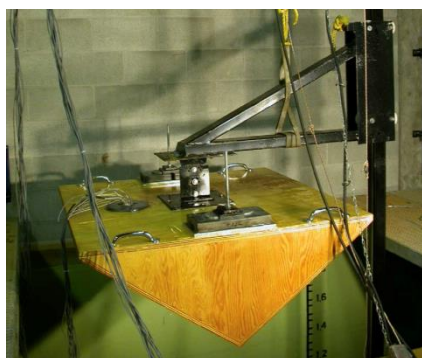


Рис. 6 Фотография экспериментальной установки [21]

Зона измерений располагается в районе миделевого сечения клина. Датчики регистрации давлений показаны на рис. 7. Расстояние между датчиками вдоль щеки клина составляет 150 мм, отстояние первого датчика от киля равно 100 мм.

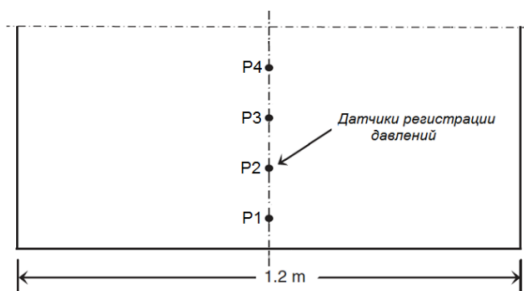


Рис. 7 Датчики регистрации давлений

На рис. 8 представлено изменение скорости тела в процессе погружения. Видно, что значение скорости, полученное с помощью численного моделирования, хорошо коррелируется с экспериментальными данными. При этом теория Ф. Кармана дает оценку сверху, а теория Г. Вагнера – снизу.

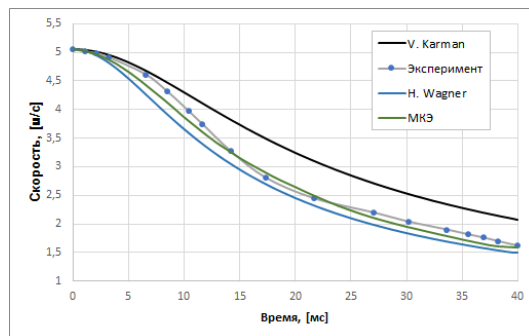


Рис. 8 Изменение скорости тела в процессе погружения

На рис. 9 показано увеличение смоченной поверхности в процессе погружения тела. Наименьшее значение соответствует теории Ф. Кармана, в которой учет подъема жидкости не учитывается. В свою очередь численное моделирование позволяет оценить величину смоченной поверхности с учетом подъема жидкости и образования брызговых струй с отрывом от поверхности тела. Последнему соответствуют участки уменьшения величины зоны контакта на рис.9 при  $t > 27$  мс, при котором наблюдается отрыв струи. Теория Г. Вагнера дает среднее значение, полученное с помощью МКЭ и теории Ф. Кармана.

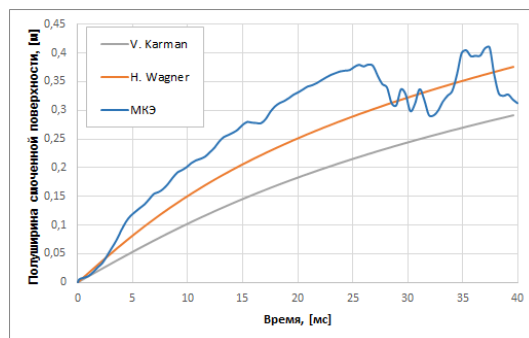


Рис. 9 Изменение полуширины смоченной поверхности в процессе погружения

На рис. 9-10 приводятся графики изменения гидродинамических давлений в точках контроля P1 – P4 в процессе погружения. Проведено сопоставление описанных в разделе 2 аналитических решений, данных эксперимента и результатов численного моделирования. Наибольшее значение во всем диапазоне действия гидродинамических давлений имеет первоначальный пик, который является максимумом. Аналитические решения строятся на большом ряде допущений, основным из которых является предположение о потенциальном течении жидкости, что приводит к завышению пиковых значений давлений. Численное моделирование также не обходится без принятия допущений, но позволяет получить приемлемые результаты по сравнению с экспериментальными данными. Расхождение составляет около 10%. Из приведенных аналити-

ческих решений классическая модель Вагнера, как и в случае со скоростью

погружения, дает нижнюю оценку для давлений, относительно других теоретических моделей. Наибольшее расхождение с экспериментальными данными и МКЭ имеет модель Кармана, ввиду не учета подъема жидкости. Модели Логвиновича и обобщенная модель Вагнера позволяют избежать особенностей в асимптотическом решении, которые приводят к бесконечным значениям давлений. При этом решения ОМЛ и ММЛ в процессе погружения совпадают, различия наблюдается лишь в момент инициализации максимальных давлений.

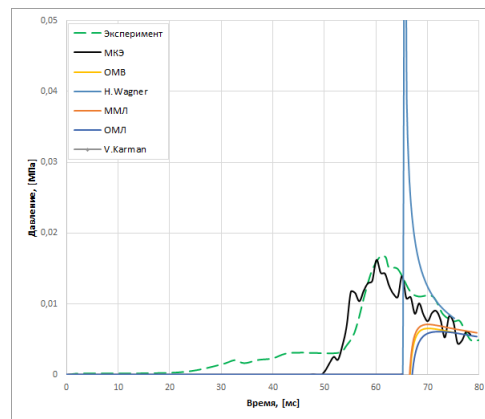


Рис. 13 Изменение давлений в точке контроля P4

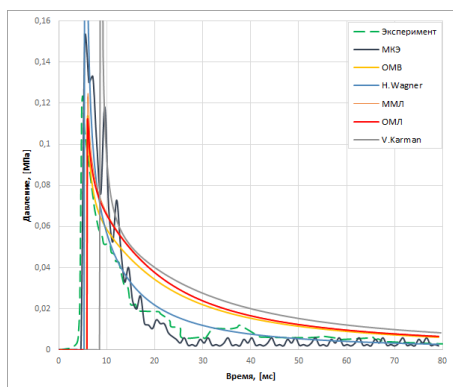


Рис. 10 Изменение давлений в точке контроля P1

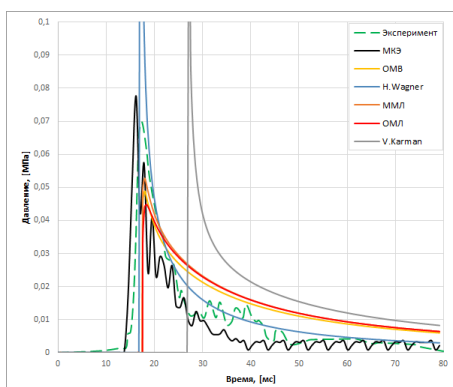


Рис. 11 Изменение давлений в точке контроля P2

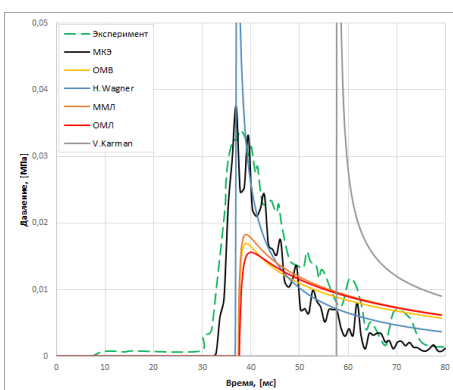


Рис. 12 Изменение давлений в точке контроля P3

### Заключение

В представленной работе рассмотрена фундаментальная постановка задачи взаимодействия конструкций с водо-воздушной средой. Несмотря на достаточно простые рассуждения, получить аналитическое решение для системы уравнений не представляется возможным, а использование численных процедур встречается заметные трудности. В связи с этим рассмотрены современные подходы к решению поставленной задачи.

Приведены модели аналитических решений для оценки избыточного гидродинамического давления, возникающего при погружении конструкции. Описан алгоритм численного моделирования, основанный на методе конечных элементов.

Для сопоставления рассмотренных аналитических методов и численного моделирования также использованы экспериментальные данные других авторов.

В качестве объекта исследования рассмотрена недеформируемая трехгранная призма в объемной постановке

При численном моделировании взаимодействие между сетками конструкции и жидкости осуществляется через алгоритм сопряжения, основанный на методе штрафа.

Изменение скорости погружения, полученное с помощью численного моделирования, хорошо согласуется с экспериментальными данными. При этом теория Ф. Кармана дает оценку сверху, а т. Г. Вагнера – оценку снизу.

Выбранный размер конечных элементов позволил получить реалистичную картину деформирования свободной поверхности жидкости, с образованием брызговых струй, а также адекватную работу алгоритма сопряжения.

В отличие от аналитических моделей, численное моделирование позволяет оценить величину смоченной поверхности с учетом подъема жидкости и образования брызговых струй с отрывом от поверхности тела. Учет данного факта приводит к

перераспределению давлений, смещению пиковых значений на более ранней стадии погружения.

Уточненные модели Логвиновича и Вагнера позволяют получать оценки гидродинамическим давлений в районе особых точек, в которых пиковые значения стремятся к бесконечности. Но при этом это не лишает их недостатка по части принятых допущений.

Построение высокоточных численных моделей позволяют получить широкий спектр выходных кинематических и силовых параметров в процессе взаимодействия конструкций с водо-воздушной средой, не ограничиваясь рамками потенциального течения жидкости, учета подъема жидкости и деформирования свободной поверхности.

### Литература

1. Григолюк Э.И., Горшков А.Г., 1976, Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью. Л.: Судостроение.
2. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Численное моделирование ударного взаимодействия конструкций корпуса с водо-воздушной средой. Труды международной конференции по судостроению и океанотехнике, 6-8 июня 2016, Санкт-Петербург, 348-355.
3. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Виртуальные модели движения судна в условиях волнения. Тезисы докладов конференции по строительной механике корабля, посвященная памяти профессора Ю.А. Шиманского, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 19-20 декабря 2013 г., СПб, 115-116
4. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А., Аунг Куи Мьинт. Моделирование повреждения корпуса судна при столкновении с подводной скалой. Материалы межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Балтийский экватор-3», 14-15 октября 2014 г. СПб, СПбГМТУ, с. 130-136.
5. Крыжевич Г.Б., Гидроупругость конструкций судна. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2006
6. Логвинович Г. В. Гидродинамика течений со свободными границами. К. - Наукова думка, Институт гидромеханики, 1969
7. Нигматулин Р.И. «Основы механики сплошных сред», Курс лекций. — Сетевая публикация, 2009. — 286 с.: ил.
8. Ростовцев Д.И., 1977, Гидроупругие колебания судовых конструкций. Л.:ЛКИ
9. Седов Л.И., Механика в СССР за 50 лет. Том 2 Механика жидкости и газа. Изд. «Наука», Москва, 1970г.

### References

1. Aquelet N, Souli M, Olovsson L, 2006, Euler-Lagrange coupling with damping effects: application to slamming problems. *Comput Methods Appl Mech Eng* 195(1–3):110–132
2. Aquelet N., Souli M., Couty N., 2003, Damping effect in fluid-structure interaction: Application to slamming problem, *Proceeding of PVP-ASME conference*, Cleveland
3. Grigolyuk E.I., Gorshkov A.G. (1976). *Elastic Structures - Fluid Interaction (Impact and Submersion)*. L., Sudostroenine. (in Russian)
4. Hallquist J.O, 2013, *LS-DYNA : Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation
5. Howison, S. D., Ockendon, J. R. & Wilson, S. K. (1991) Incompressible water-entry problems at small deadrise angles. *J. Fluid Mech.* 222, 215–230
6. Karman T.V. The impact on seaplane floats, during landing. *NACA-TN-321*, 1929
7. Korobkin, A.A., 1996. Water impact problems in ship hydrodynamics. In: Ohkusu, M. (Ed.), *Advances in Marine Hydrodynamics*. Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 323–371
8. Korobkin A. Analytical models of water impact. *European Journal of Applied Mathematics*, 2004, pp 821-83
9. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. (2016). Numerical Modeling of Shock Interaction of Hull Structures with Water-Air Environment, *Collection of Papers of International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering*, June 6-8, 2016, St-Petersburg (in Russian), 348-355.
10. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. (2013). Virtual Models of Vessel Operation in Sea Conditions. *Conference on Strength of Ships Dedicated to the Memory of Prof. Yu.A. Shimansky. Theses of Papers*, Krylov State Research Center, December 19 - 29, 2013, St.Petersburg, (in Russian),.115-116
11. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A., Myint A.K. (2014). Simulation of Vessel Hull Damage in Collisions with Underwater Rocks. *Materials of Inter-University Theoretical and Practical Conference of*



- Students, Graduate Students and Young Specialists “Baltic Equator”, October 14 – 15, 2014. St.Petersburg, St.Petersburg Marine Technical University, 130-136.
12. Kryzhevich G.B, Hydroelasticity of ship structures. - St. Petersburg: Central Research Institute. Acad. A.N. Krylova, 2006 (In Russian)
  13. Logvinovich G.V, Hydrodynamics of flows with free boundaries. K. - Naukova Dumka, Institute of Hydro-mechanics, 1969, In Russian
  14. LS-DYNA Aerospace Working Group Modeling Guidelines Document, Version 14-1 dated August 12, 2014
  15. LS-DYNA Keyword User's Manual V.971, Livermore Software Technology Corporation
  16. Mei, X., Liu, Y. & Yue, D. K. P. (1999) On the water impact of general two-dimensional sections. Appl. Ocean Res. 21, 1–15
  17. Nigmatulin R.I. «Fundamentals of continuum mechanics», In Russian, 2009. 286 p.
  18. Rostovtsev D.I., 1977, Hydroelastic vibrations of ship structures. L.: LKI, In Russian
  19. Sedov L.I., Mechanics in USSR for 50 years. Vol. 2 Mechanics of fluid and gas. In Russian, “Nauka”, Moscow 1970r.
  20. Wagner H., 1932, Uber Stoß- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, Zeitschrift f. Angew. Math. Und Mech., 12, .293-235
  21. Yettou E.-M., Alain Desrochers, Yvan Champoux. Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge, Fluid Dynamics Research 38 (2006) 47–66
  22. Zhao, R., Falinsen, O. & Aarsnes, J. (1996) Water entry of arbitrary two-dimensional sections with and without separation. Proc. 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, pp. 118–133. Trondheim, Norway.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.563.21

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЛЕДОСТОЙКИХ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ КРУГЛОГОДИЧНУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ В АРКТИКЕ

**Геннадий Брониславович Крыжевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики корабля

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: morintex\_spb@mail.ru; G\_Kryzhevich@ksrc.ru

### Аннотация

Целью работы является выявление прогрессивных тенденций в создании ледостойких плавучих буровых установок и выработка инновационного проектного решения. Для достижения этой цели выполнен сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства ледостойких установок и поиск прогрессивных технических решений, обеспечивающих круглогодичность эксплуатации установок в сложных ледовых условиях и повышение их экономической эффективности. В результате поиска признаны эффективными решения, связанные с применением ледорезной формы стабилизирующих колонн, ледовых зубьев в их подводной части, ледоразрушающих наделок на колоннах, а также с выполнением колонн в виде наклоненной к водной поверхности конструкции.

Показано, что плавучая буровая установка (ППБУ) в виде тримарана с турелью является одним из перспективных вариантов компоновки ледостойкой платформы для арктического шельфа и включает целый ряд решений, обеспечивающих снижение затрат на разведочное бурение. Рекомендации работы направлены на повышение надежности и рентабельности ледостойких ППБУ при эксплуатации в Арктике.

**Ключевые слова:** ледостойкие платформы, полупогружные плавучие буровые установки, надежность платформ при эксплуатации в Арктике.

## CONCEPTUAL SOLUTIONS OF THE ICE-RESISTANT FLOATING DRILLING UNITS FOR YEAR-ROUND OPERATION IN THE ARCTIC

**G. Kryzhevich**

the professor, Dr.Sci.Tech.,

the professor of department of ship strength

State marine technical university of Saint-Petersburg

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

e-mail: morintex\_spb@mail.ru; G\_Kryzhevich@ksrc.ru

### Abstract

The work goal consists in identification of advanced trends in development of ice-resistant floating drilling units and elaboration of the innovative design solution. To achieve this goal, home and foreign experience in design and construction of ice-resistant units were analyzed comparatively and advanced engineering solutions providing year-round operation of the units in severe ice conditions and increasing their economic efficiency were searched. Efficient solutions were found including ice-cutting shapes of stabilizing columns, ice horns in the underwater parts of the columns, ice breaking attachments on the columns as well as their inclination to water surface.

It is shown that ice-resistant semisubmersible floating drilling unit (SFDFU) in trimaran form with a turret is one of the promising versions of arranging ice-resistant platforms for the Arctic shelf and includes a series of solutions providing cutting of costs for exploratory drilling. The work recommendations are intended for increasing ice-resistant SFDFU reliability and profitability in the course of operation in the Arctic.

**Key words:** ice-resistant platforms, semisubmersible floating drilling units, platforms reliability in the course of operation in the Arctic.

### 1. Ледостойкие плавучие буровые установки судового типа

Сложность освоения месторождений нефти и газа, открытых в арктических зонах, связана с необходимостью применения нетрадиционных технологий и принципиально новых технических средств, соответствующих сложности природных условий. Выбор архитектурного облика и конструктивного оформления морского нефтегазового сооружения предопределяется прежде всего толщиной ледового покрова и глубиной моря. Известно достаточно много архитектурно-компоновочных типов ледостойких сооружений, обладающих определенными преимуществами и недостатками. Обычно поиск технических решений для подобных сооружений приводит к следующим типовым формам платформ (рис. 1).

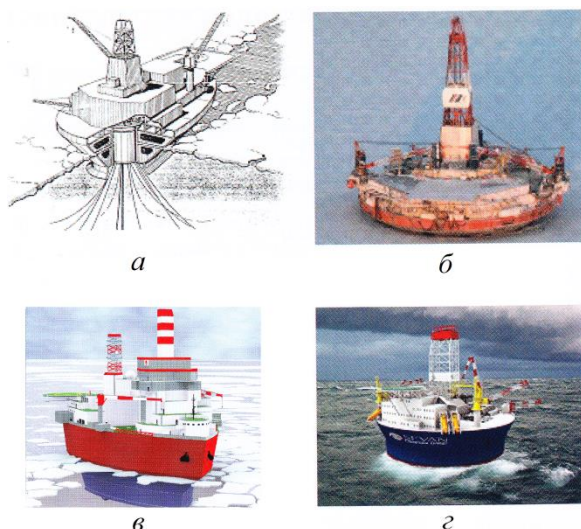


Рис. 1. Типы буровых установок для круглогодичной эксплуатации в Арктике:

*а* – судно яйцеобразной формы; *б* – установка с корпусом в виде тела вращения (ЛПБУ «Kulluk»); *в* – ЛПБУ клиновидной формы (концепция ЛПБУ ЦКБ «Коралл»); *г* – установка с корпусом в виде тела вращения (ЛПБУ «Sevan»).

Буровая установка с судовыми обводами яйцеобразной формы (egg form) фирмы Mitsui (рис. 1а), снабженная турельным устройством, обладает повышенной ледостойкостью благодаря возможности разрушения изгибом дрейфующего льда, при котором наблюдается снижение ледовых нагрузок. Кроме того, наличие турели обеспечивает возможность отсоединения системы удержания и райзера с последующим уходом установки с точки эксплуатации при экстремальном ухудшении ледовой обстановки.

Плавучие платформы с формой тел вращения в нижней их части (рис. 1б и 1г) также могут иметь хорошую ледостойкость, особенно в тех случаях, когда они имеют форму конуса с вертикальной

осью в районе ватерлинии. Клиновидная форма корпуса платформы (рис. 1в), снабженной турельной системой удержания, позволяет снижать ледовые нагрузки и обеспечивать самоориентацию ледостойкой установки по отношению к направлению дрейфа ледового поля.

Общим недостатком таких типов платформ является высокая материалоемкость конструкций, большая стоимость строительства, малая мобильность и интенсивная качка в условиях волнения.

### 2. Полупогружные плавучие буровые установки для Арктики

Полупогружные плавучие буровые установки занимают доминирующее положение среди морских буровых установок, применяемых в практике морского разведочного бурения. К достоинствам этих установок следует отнести:

- относительно высокую мобильность, менее сложную постановку на рабочую точку и снятие с неё по сравнению с самоподъемными плавучими буровыми установками;

- возможность проводить глубоководное бурение на глубинах моря 150-1500 м и более, в настоящее время имеются несколько установок, способных осуществлять буровые работы на глубинах моря 2000-3000 м;

- малую интенсивность качки и высокую стабильность удержания на рабочей точке при воздействии морского волнения;

- большую приспособленность для работы в условиях газовых фонтанов и достаточную остойчивость при их наличии.

Вместе с тем в арктических регионах ППБУ до сих пор эксплуатируются крайне редко. Это обстоятельство вызвано тем, что использование ППБУ в сложных ледовых условиях по сравнению с эксплуатацией этих сооружений при отсутствии ледяного покрова требует более значительных капитальных и эксплуатационных затрат [1]. При этом на резкий рост затрат влияет не только необходимость усиления конструкций ППБУ и системы ее удержания (позиционирования) с целью придания установке повышенной ледостойкости, но и потребность использования при эксплуатации в тяжелых ледовых условиях весьма дорогостоящих мощных ледокольных судов с ядерными энергетическими установками для обеспечения непрерывного ледового менеджмента, гарантирующего безопасность эксплуатации. Именно поэтому обычно стараются избегать круглогодичной эксплуатации ППБУ на точке бурения в чрезмерно сложных ледовых условиях. Ледовые подкрепления большинства созданных установок позволяют буксировать и осуществлять их эксплуатацию лишь в относительно легких ледовых условиях. Для защиты райзеров ото льда на подобных объектах всегда предусматривается дополнительная центральная колонна (защитный кожух), сквозь которую осуществляется бурение скважины. Такие ППБУ вы-

полняют основные функции только в течение благоприятного «окна» (при отсутствии ледяного покрова с большой толщиной). Оценка продолжительности этого «окна» должна выполняться взвешенно, исходя из климатических условий акватории и данных метеопрогнозов.

Отмеченные особенности эксплуатации ледостойких ППБУ делают необходимым экономически обоснованный подход к назначению уровня ледостойкости ППБУ и ее обеспечению за счет конструктивных мер. Этот подход включает поиск оптимальных технических решений, обеспечивающих наибольшую экономическую эффективность ППБУ в конкретных условиях эксплуатации, характеризующихся:

- ледовой обстановкой;
- глубиной моря;
- повторяемостью интенсивного волнения;
- удаленностью от места убежища, используемого при плохой ледовой обстановке, и от других объектов инфраструктуры;
- экологической спецификой региона.

Поиск рациональных проектных решений обычно приводит к некоторому компромиссу между уровнем ледостойкости установки, ее материалоемкостью, ходкостью (включая ходкость во льдах) и интенсивностью качки на морском волнении. Такой поиск, как правило, заканчивается одним из двух типовых решений, существенно отличающихся уровнем ледостойкости. При первом из них идет на создание ППБУ с ограниченной ледостойкостью, требующей ее снятия с рабочей точки при угрозе возникновения недопустимо тяжелой ледовой обстановки. При втором – создают ППБУ, допускающую круглогодичную эксплуатацию (в том числе в суровых ледовых условиях). Такая установка представляет собой большое и дорогостоящее сооружение, такое, например, как ППБУ «JBF ARCTIC» с проектным водоизмещением порожнем около 70 тыс. т.

Установки с ограниченной ледостойкостью значительно меньше (в частности, платформа «Полярная звезда» имеет водоизмещение примерно в два раза меньшее, чем «JBF ARCTIC»). Отсюда и следуют относительно низкие затраты на строительство таких платформ. По своему архитектурно-компоновочному облику они могут мало отличаться от традиционных ППБУ. Основные различия состоят в следующем:

- в стремлении исключить применение подкрепляющих ППБУ раскосов, пересекающих ватерлинию и увеличивающих ледовые воздействия на платформу;
- в создании ледового (усиленного) пояса на конструкциях, взаимодействующих со льдом, а, иногда, и в установке конических ледоразрушающих наделок;
- в создании защитных конструкций для райзера [2] или специальной центральной колонны, внутри которой располагается райзер.

Практика создания ледостойких ППБУ показывает, что в большинстве случаев проектанты отдают предпочтение созданию объектов с

ограниченным уровнем ледостойкости, но в этой практике есть и исключения. К настоящему времени имеется хорошо проработанный компанией Huisman проект полупогружной установки [1], предназначенной для круглогодичной эксплуатации в экстремальных ледовых условиях (при толщине льда порядка 2-3 м) – ППБУ «JBF ARCTIC» (рис. 2). В соответствии с концепцией этой компании установка (рис. 3) состоит из кольцеобразного понтона 1 диаметром 116 м, на котором закреплены восемь наклонных стабилизационных колонн 2 с решетками между ними. Решетки препятствуют прониканию крупных фрагментов разрушаемого льда в пространство между колоннами и созданию опасных условий для функционирования райзера. На колоннах располагается верхнее строение 3 со сдвоенной буровой вышкой 4.

Органическими недостатками традиционного архитектурно-компоновочного облика ППБУ является:

- необходимость создания специальных материалоёмких конструкций защиты райзера от ледовых воздействий;
- возможность заклинивания обломков льда между стабилизирующими колоннами (а также между колоннами и защитой райзера), вызывающего увеличение глобального воздействия ледяных образований на ППБУ.



а



б



в

Рис. 2. ППБУ «JBF ARCTIC»:

а – общий вид (опорное основание показано в разрезе); б – вид в условиях волнения; в – вид в ледовых условиях

ППБУ «JBF ARCTIC» лишена этих недостатков, однако имеет повышенную склонность к формированию на ней ледовых воротников. Такая склонность обусловлена наличием массивных металлических конструкций, создающих обширные каналы теплопередачи от погруженного в воду опорного основания к верхнему строению и способствующие процессу образованию льда на участках колонн, расположенных ниже ватерлинии. Развитие этого процесса может приводить к формированию внутри опорного основания сплошной массивной ледяной пробки. Кроме того, появлению массивной пробки может способствовать заброс в условиях ветра и волнения ледяной шуги в застойную зону (в подкупольное пространство установки, образуемое наклонными колоннами и верхним строением).

Учитывая ориентацию этой ППБУ на экстремальные ледовые условия эксплуатации, можно высказать следующее соображения. Если ледовые силы назначены обоснованно, а параметры ледового пояса и якорных линий выбраны правильно, то установка может вполне удовлетворять требованиям эксплуатационной безопасности и обеспечивать высокую прибыль от эксплуатации при тяжелых ледовых условиях. В этом случае, до завершения строительства скважины установка может не покидать район буровых работ по ледовым условиям, поскольку она рассчитана на экстремальные воздействия льда. Но эта концепция может быть нерациональной при относительно малой продолжительности экстремальных ледовых условий в районе бурения.

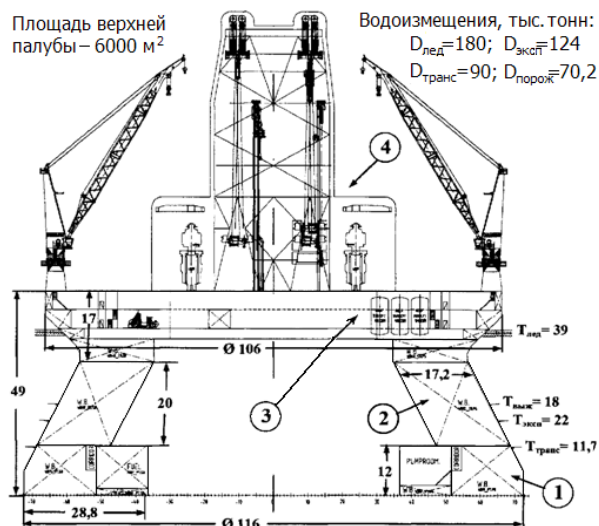


Рис. 3. Схема сечения ППБУ «JBF ARCTIC» по оси симметрии опорного основания с указанием основных размеров и уровней осадок (в метрах), соответствующих условиям эксплуатации в режимах: ледовом, при выживании, бурении на чистой воде и транспортировке

Максимальная глубина акватории в местах эксплуатации ППБУ «JBF ARCTIC» не должна превышать 1500 м, глубина бурения - 12000 м. Удержание на точке обеспечивают 20 якорных линий в виде цепей калибра 162 мм.

В проекте для каждого режима эксплуатации выбраны 4 различные осадки, обеспечивающие:

- хорошее демпфирование качки на волнении за счет рассеяния энергии при пересечении наклонными СК поверхности жидкости, сопровождающемся интенсивным волнообразованием;
- снижение ледовых нагрузок благодаря разрушению льда изгибом при его взаимодействии с наклонными СК;
- повышение ходкости ППБУ благодаря малой осадке в транспортном положении.

Сравнительные модельные испытания ходовых и ледовых качеств различных ППБУ («JBF ARCTIC», классической и цилиндрической форм), показали преимущества технических решений, использованных при проектировании «JBF ARCTIC» [1].

Ликвидация недостатков традиционного облика полупогружной установки достигается за счет перехода от катамаранной схемы сооружения к тримаранной (рис. 4). Установка состоит из трёх понтонов (одного центрального и двух боковых), соединяемых с верхним строением с помощью трёх стабилизирующих колонн. Эти колонны могут быть соединены между собой в нижней части с помощью распорок.

Стабилизирующие колонны и понтоны содержат балластные цистерны. Понтоны имеют закругления в оконечностях, улучшающие ходовые качества ППБУ. Для придания ледорезных качеств носовые оконечности стабилизирующих колонн имеют клинообразную форму поперечных сечений, а в носовых частях понтонов содержатся ледовые зубья. Форштевни стабилизирующих колонн в районе ватерлинии выполняются с наклоном, обеспечиваю-

щим разрушение льда изгибом. Сами ватерлинии стабилизирующих колонн в носовых частях заострены. Боковые понтоны и колонны сильно сдвинуты в корму ППБУ по отношению к центральному понтону. При этом носовые части боковых колонн располагаются после кормовой части центральной колонны. Такое взаимное расположение колонн обеспечивает прохождение обломков льда под установкой (под верхним строением) без заклинивания.

Установка включает в себя вертикальную шахту, проходящую через верхнее строение, центральную стабилизирующую колонну и центральный понтон. В шахте располагается райзер. В нижней части шахты расположена ниша для турели, к которой присоединяется якорная система удержания. Заострение носовых оконечностей колонн совместно с их взаимным расположением обеспечивают ориентацию носовой части ППБУ навстречу движению ледового поля.

На верхней палубе верхнего строения расположены буровая установка, блок технологического оборудования, жилой модуль, вертолётная площадка, спасательные шлюпки.

Расчётные оценки показывают, что при габаритной длине установки 114 м и ширине 68 м её водоизмещение составляет 21100 т. При расчётной толщине ровного льда 3 м ледовая нагрузка составит около 7,5 МН, нагрузка от тороса – около 16 МН. Следует подчеркнуть, что эти значения ледовых нагрузок оказывают прямое влияние на количество и массу связей якорной системы. Так как нетрадиционная форма ледорезных стабилизирующих колонн способствует значительному снижению воздействий ледовых нагрузок на сооружение, масса якорной системы позиционирования и усилия в якорных линиях в сравнении с аналогичной системой позиционирования ППБУ с традиционной архитектурно-компоновочной схемой будут меньше.

ППБУ-тримаран с турелью является одним из перспективных вариантов компоновки ледостойкой платформы для использования при освоении глубоководных месторождений арктического шельфа и включает целый ряд инновационных решений, обеспечивающих снижение затрат на разведочное бурение. При этом практический интерес представляет и вариант, в котором отсутствует турельное устройство и якорные линии, которые заменяются системой динамического позиционирования.

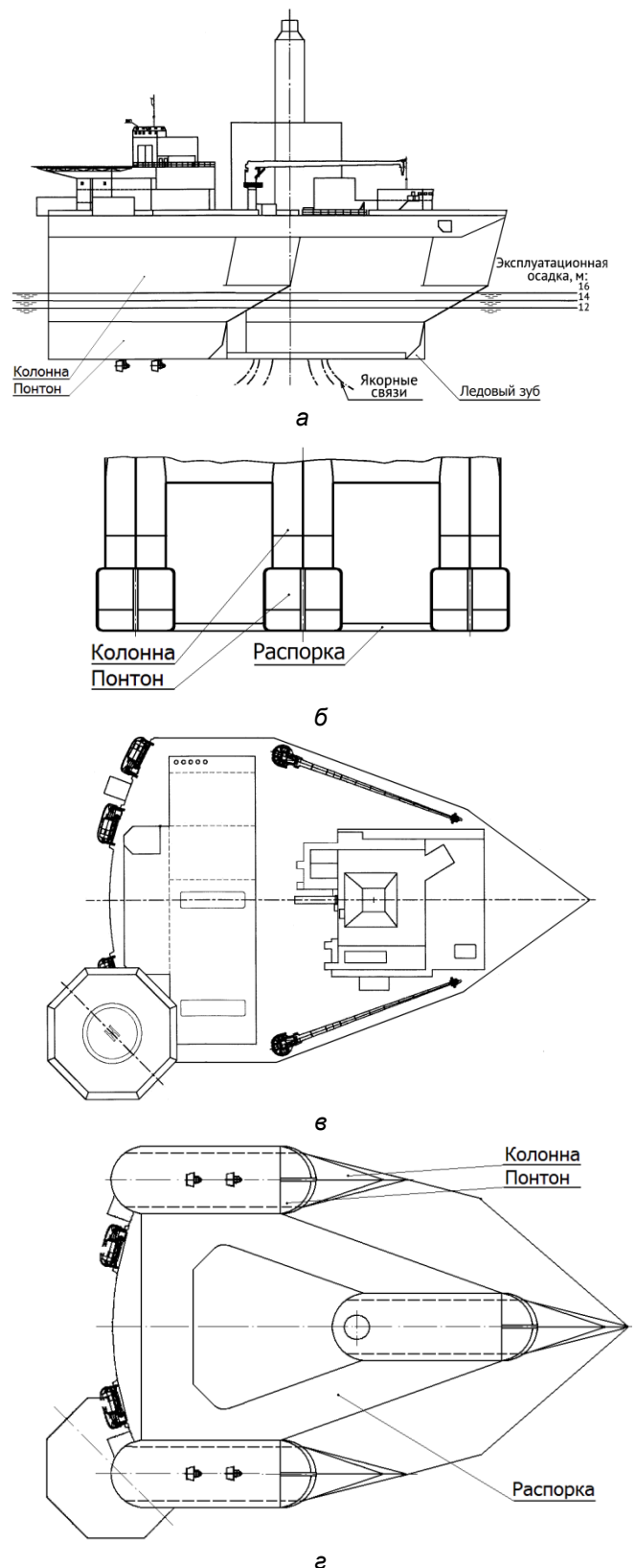


Рис. 4. Перспективная ледостойкая ППБУ: вид сбоку (а); вид спереди на стабилизирующие колонны и понтоны (б); вид сверху (в); вид снизу (г).

### 3. Некоторые рекомендации по проектированию ледостойких ППБУ

Многолетний опыт эксплуатации ППБУ показал, что принцип полупогружных корпусов, обеспечив-

ших ППБУ ведущие позиции в сегменте буровых установок, сохранит важную роль и при создании новых ледостойких платформ. При этом особую значимость приобретает дальнейший поиск оптимальных технических решений по созданию разнообразных конструктивных типов ППБУ, способных обеспечить высокую рентабельность установок в конкретных природных условиях эксплуатации, характеризующихся параметрами ледовых полей, волнения и ветра. Традиционные и вновь предлагаемые архитектурно-компоновочные решения нацелены на уменьшение площади действующей ватерлинии, способствующей снижению волновых и ледовых воздействий на установки, сохранение важного свойства "волнопрозрачности" погруженной части ППБУ и, как следствие, на уменьшение ее горизонтальных и вертикальных перемещений при качке. Созданные на этой основе ППБУ смогут быть вполне ледостойкими, удобными в эксплуатации и занимать одно из лидирующих положений на мировом рынке океанотехники.

Рационализация конструкций ледового пояса колонн с целью уменьшения ледовых нагрузок и материалоемкости является одним из основных направлений совершенствования ледостойких установок. В этом плане наработки, сделанные при создании первых отечественных ледостойких ППБУ, позволяют предложить ряд новых конструктивных решений [3], направленных на повышение ледостойкости таких платформ и снижение толщин элементов ледового пояса. Важность подобного снижения вызвана не только необходимостью минимизации металлозатрат при строительстве ППБУ, но и трудноразрешимыми проблемами, возникающими при попытке выполнения требований классификационных обществ к ледостойкости конструкций платформ в том случае, когда свариваемые элементы конструкции имеют толщину порядка 30 мм и более [5].

К настоящему времени накоплен некоторый опыт проектирования и эксплуатации ледостойких ППБУ, который позволяет считать их надёжными и отвечающими современным требованиям морского бурения в арктических условиях. На основе этого опыта намечаются рациональные архитектурно-конструктивные формы ледостойких ППБУ, для которых характерны:

- использование двух или трех упрощённых подводных понтонов со стабилизирующими колоннами (по одной или по две на каждый понтон). Подводные понтоны могут соединяться между собой расположенными в горизонтальной плоскости распорками. Какие-либо раскосы, пересекающие ватерлинию, отсутствуют, что позитивно отражается на уровне волновых и ледовых воздействий на платформы;

- **упрощенная конфигурация стабилизирующих колонн (от цилиндрических до прямоугольных);**

- **применение наклонных колонн (либо ледоразрушающих наделок [3]), увеличивающих демпфирование качки и снижающих ледовые нагрузки;**

- **применение ледорезной формы стабилизирующих колонн и ледовых зубьев в их подводной части.**

При использовании прямоугольных (квадратных) колонн со скошенными углами, одна из граней колонн, как правило, устанавливается заподлицо с бортовой обшивкой, что облегчает обеспечение прочности сооружения в целом.

Заметим, что наклонная конфигурация стабилизирующих колонн весьма эффективна, поскольку не только уменьшает качку ППБУ на волнении, но и вызывает разрушение изгибом ледяного покрова, наползающего на боковую поверхность колонны. При этом уровень ледовых нагрузок по сравнению с вертикальной цилиндрической колонной существенно снижается. Поэтому в обозримом будущем наклонные стабилизирующие колонны могут стать одной из важнейших особенностей облика ледостойких ППБУ. Другой особенностью облика должно стать уменьшенное число колонн, приходящихся на один понтон (не более двух). Малое число колонн не только способствует снижению глобальных ледовых воздействий на ППБУ, но и позволяет снизить материалоемкость установок (не снижая показателей жесткости и прочности), поскольку при установленном ограничении на массу конструкций увеличение размеров сечений колонн более благоприятно сказывается на увеличении суммарных значений моментов инерции и моментов сопротивлений сечений, чем увеличение числа колонн.

#### Литература

1. Плавающие полупогружные буровые установки: история, современность, перспективы. Аналитический обзор. – СПб.: ФГУП "Крыловский государственный научный центр", 2014, 212 с.
2. Крыжевич Г.Б., Подгорный Л.Н., Попов Н.Г., Шапошников В.М. Анализ конструктивного облика и материалоемкости конструкций ледостойких плавучих буровых установок на примерах создания крупнотоннажных платформ "Полярная звезда" и CS-50. // Proceedings of International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering, NAOE2016, June 6-8, 2016, Saint-Petersburg, Russia.

3. Крыжевич Г.Б. Новые конструктивные решения для ледового пояса стальных морских сооружений. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015, вып. 86(370), – С. 133-138.
4. Крыжевич Г.Б., Попов Н.Г. Монтаж плавучих буровых установок методом надвига на плаву с деформированием конструкций опорного основания. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. Санкт-Петербург, 2016, № 44/45. – С. 32-40.
5. Крыжевич Г.Б. Прочность толстолистовых сварных конструкций судов и океанотехники в арктических условиях. // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2017, 2(380). – С. 32-41.

### References

1. Plavuchye polupogruzhnye burovye ustanovki: istoriya, sovremennost', perspektivy. Analitichesky obsor. – SPb: FGUP "Krylov gosudarstvenny nauchny centr", 2014, 212 s.
2. Kryzhevich G.B., Podgornyy L.N., Popov N.G., Shaposhnikov V.M. Analiz konstruktivnogo oblica i materialoemkosti konstruksiy ledostoykikh plavuchykh burovykh ustanovok na primerah sozdania krupnotonnazhnyh platform "Polarnaya zvezda" i CS-50. // Proceedings of International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering, NAOE2016, June 6-8, 2016, Saint-Petersburg, Russia.
3. Kryzhevich G.B. Novye konstruktivnye resheniya dlya ledovogo poyasa stal'nykh morskikh soorugeniyy // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2015, vyp. 86(370), – s. 133-138.
4. Kryzhevich G.B., Popov N.G. Montazh plavuchykh burovykh ustanovok metodom nadviga na plavu s deformirovaniem konstruksiyi opornogo osnovaniya. // Nauchno-technicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudohodstva. Sankt-Petersburg, 2016, № 44/45. – s. 32-40.
5. Kryzhevich G.B. Prochnost' tolstolistovykh svarnykh konstruksiyi sudov i okeanotehniki v arkticheskikh usloviyah. // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. – 2017, 2(380). – s. 32-41.



УДК 656.6.08

## МЕТОД ОЦЕНКИ КОНСТРУКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

**Алексей Леонидович Стариченков**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, тел. +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

**Дмитрий Алексеевич Скороходов**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,  
Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук  
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13  
тел. 8(812) 323-29-54, e-mail: info@iptran.ru

**Сергей Николаевич Турусов**

доктор технических наук, профессор, генеральный директор,  
Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения», 196105, Россия, Санкт-Петербург, улица Благодатная, дом 2, тел. +7(921) 752-65-44, e-mail: serniktur@yandex.ru

### Аннотация

В настоящее время проблема безопасности должна рассматриваться как важнейший аспект проектирования, создания и использования различных транспортных средств. Это обусловливается, с одной стороны, сложностью структуры указанных объектов, а, с другой стороны, тем возможным ущербом, который может быть нанесен в случае их отказа, включая гибель пассажиров и экипажа транспортного средства, а также негативные последствия, связанные с повреждением перевозимых грузов. Принцип комплексной оценки транспортной безопасности предполагает рассмотрение безопасности транспортного средства, как его интегральной характеристики, определяющей способность осуществлять перевозку пассажиров и грузов без угрозы для жизни и здоровья людей, с соблюдением сохранности грузов, самого транспортного средства и окружающей среды. Согласно данному принципу одной из наиболее важных составляющих безопасности является конструктивная безопасность транспортных средств. В статье рассмотрен метод обеспечения конструктивной безопасности на примере одного из наиболее перспективных видов транспорта, а именно судна на подводных крыльях. Представлены структура и отдельные видеокдры реализующего данный метод программного обеспечения.

**Ключевые слова:** безопасность, судно на подводных крыльях, проектирование, конструктивный элемент, среда моделирования, интерфейс программы.

## A METHOD FOR THE ASSESSMENT OF STRUCTURAL SAFETY HYDROFOILS

**A. Starichenkov**

Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of Department,  
Saint Petersburg Electrotechnical University LETI,5,  
Professor Popov street, Saint-Petersburg, 197376  
phone: +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

**D. Skorokhodov**

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Chief Researcher Officer,

Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences  
199178, Saint-Petersburg, Vasilevsky Ostrov, 12 line, h.13  
phone: 8(812) 323-29-54, e-mail: skorohodda@mail.ru

### S. Turusov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Director,  
Joint-stock company "Russian research design and technological Institute of electrical engineering", 2, Blagodatnaya street, Saint-Petersburg, 196105,  
phone: +7(921) 752-65-44, e-mail: serniktur@yandex.ru

### Abstract

Currently, the safety problem should be considered as the most important aspect of the design, build and use different vehicles. This is due, on the one hand, the complexity of the structure of these objects, and, on the other hand, the possible damage that can be inflicted in case of their refusal, including the death of the passengers and crew vehicle, as well as the negative consequences associated with damage to the transported goods. The principle of integrated assessment of transportation safety involves the consideration of vehicle safety, as its integral characteristics, defining the ability to carry passengers and cargo without endangering the life and health of people, respecting the integrity of goods, the vehicle itself and the environment. According to this principle, one of the most important components of safety is the structural safety of vehicles. This paper presents a method of ensuring structural safety on the example of one of the most perspective types of transport, namely, hydrofoil. The article presents structure and the screenshot that implements this method software.

**Keywords:** Safety, hydrofoil, design, constructive element, environment modeling, program interface.

### Введение

Суда на подводных крыльях (СПК) – современное, удобное и рентабельное транспортное средство. Однако, в то же время, СПК – один из наиболее сложных для проектирования классов судов. Это в первую очередь связано со сложной динамикой судна [1] и большим числом ограничений, накладываемых на СПК как динамический объект и объект управления.

Суда на подводных крыльях в большей степени, чем обычные водоизмещающие суда, подвержены авариям. Поэтому качественное, всестороннее моделирование, позволяющее выявить ошибки в проектировании, неточности расчета характеристик и неадекватные алгоритмы управления, играет важную роль в процессе проектирования этого класса судов.

Кроме того, при создании СПК применяются различные области знаний, принадлежащие к различным научным дисциплинам. Над проектом работает несколько авторских коллективов инженеров различных специальностей. Следует также учесть, что проектирование СПК зачастую связано со сложными, дорогостоящими стендовыми испытаниями и испытаниями в опытовом бассейне. Именно поэтому возникла необходимость в применении комплексного, системного подхода к проектированию СПК. Наиболее перспективным в этом смысле является метод компьютерного моделирования, позволяющий объединить различные этапы проектирования судна и построить

единую компьютерную модель судна, включающую все его системы и конструкции.

### 1. Единая среда моделирования конструктивных особенностей СПК, как метод повышения конструктивной безопасности транспортного средства

Рассматриваемая составляющая безопасности [2, 3] определяется конструктивными особенностями транспортного средства и его технических систем управления и движения, заложенными на этапе проектирования, а также насыщенностью энергетическим оборудованием, электронными системами и системами обеспечения безопасности. Поскольку модернизация транспортного средства влечет за собой его конструктивные изменения и требует соответствующих проектных проработок, будем относить ее в дальнейшем также к стадии проектирования. Необходимо отметить, что конструктивная безопасность прямо или опосредованно влияет на безопасность эксплуатации транспортного средства. Например, сложности с обеспечением маневренности или остойчивости СПК вызывают избыточное напряжение экипажа во время рейса и тем самым снижают безопасность за счет человеческого фактора. Таким образом, конструктивная безопасность закладывается на стадии проектирования транспортного средства и является необходимым условием обеспечения его безопасности на протяжении всего жизненного цикла.

При существующей схеме проектирования оценка конструктивной безопасности СПК и его

подсистем сводится к предоставлению на рассмотрение наблюдающих органов расчетных данных по соответствующим нормативным требованиям. Моделирование отдельных элементов и систем СПК производится различными методами с использованием моделей различного вида и силами различных организаций, участвующих в проектировании. В результате достоверная оценка функциональных характеристик и конструктивной безопасности СПК как сложной системы может быть проведена только на стадии натурных испытаний. Выявленные отклонения от желаемых характеристик, ошибочные или неотработанные проектные решения на этом заключительном этапе создания трудно устранимы. Однако, число субъективных, в том числе ошибочных, проектных решений может быть сведено к минимуму при использовании метода повышения конструктивной безопасности СПК, разработанного специалистами лаборатории «Проблем безопасности транспортных систем» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем транспорта им.Н.С.Соломенко Российской академии наук [4, 5]. Метод позволяет рассмотреть в процессе проектирования большое число вариантов основных конструктивных характеристик транспортного средства и его подсистем с учетом их взаимовлияния, а также влияния на показатели безопасности проектируемого объекта. Разработанный метод заключается в создании единой среды моделирования основных конструктивных элементов СПК и его подсистем, используемой на всех этапах проектирования. При этом на среду моделирования накладывается ряд требований и рекомендаций, а именно:

- среда моделирования должна быть достаточно гибкой для рассмотрения как можно более широкого спектра различных конструктивных решений при проектировании СПК;
- в основе среды моделирования должна лежать тщательно разработанная нелинейная математическая модель динамики движения СПК и расчета его различных физических и технических параметров (модель должна быть максимально приближена к реальным условиям);
- среда моделирования должна иметь удобный и интуитивно понятный пользовательский интерфейс;
- учитывая, что моделирование включает в себя знания различных дисциплин, среда должна иметь подробный справочный блок;
- среда должна иметь прозрачную модульную архитектуру для упрощения подключения к ней внешних расчетных модулей и блоков;
- быстродействие работы в режиме моделирования должно быть по возможности максимально приближено к реальному времени;
- среда должна включать в себя различные средства визуализации конструкторской и статистической информации (трехмерные, объемные модели, графики процессов и т.д.);
- в среду могут быть включены элементы экспертной системы для формирования рекомендаций по улучшению и оптимизации конструкции различных узлов рассматриваемого транспортного средства.

Структура разработанной среды моделирования представлена на рис. 1.

В первом блоке разработанной среды моделирования задаются или формируются конструктивные факторы и другие условия, влияющие на динамические свойства рассматриваемого транспортного средства как объекта моделирования (компоновка, массо-инерционные характеристики, геометрия корпуса, состав и размеры исполнительных органов, двигатель-двигательный комплекс, система управления движением).

Второй блок представляет собой обобщенную нелинейную математическую модель динамики СПК, маневрирующего в пространстве под действием внешних возмущений. В этом блоке производится математическое моделирование динамики рассматриваемого транспортного средства, которое выполняется с использованием самостоятельных, но взаимосвязанных математических моделей его элементов.

Узловыми элементами обобщенной математической модели, предназначенной для решения комплекса задач системного обеспечения конструктивной безопасности СПК с произвольной крыльевой схемой, являются частные математические модели расчета внешних гидродинамических сил и моментов на элементах крыльевого комплекса, динамики СПК, ветро-волновых возмущений, электрогидравлического привода, системы управления движением. Кроме того, в среде моделирования важную роль играют блоки обработки и оценки результатов моделирования. После обработки результатов моделирования проектантом формируются функциональные и экономические показатели, на основе которых, в свою очередь, производится оценка полученных результатов. На основании этой оценки, если требуется, производится коррекция геометрии СПК, параметров его технических систем, алгоритмов управления и других конструктивных факторов, влияющих на безопасность рассматриваемого транспортного средства. В систему моделирования включены также вспомогательные блоки ввода информации. Блок задания геометрии отвечает за ввод геометрических и инерционных характеристик СПК, крыльевого комплекса и его технических систем. С ним связан вспомогательный графический блок, с помощью которого можно осуществлять визуальное изменение

формы элементов крыльевой схемы, архитектуры корпуса для расчета его парусности.

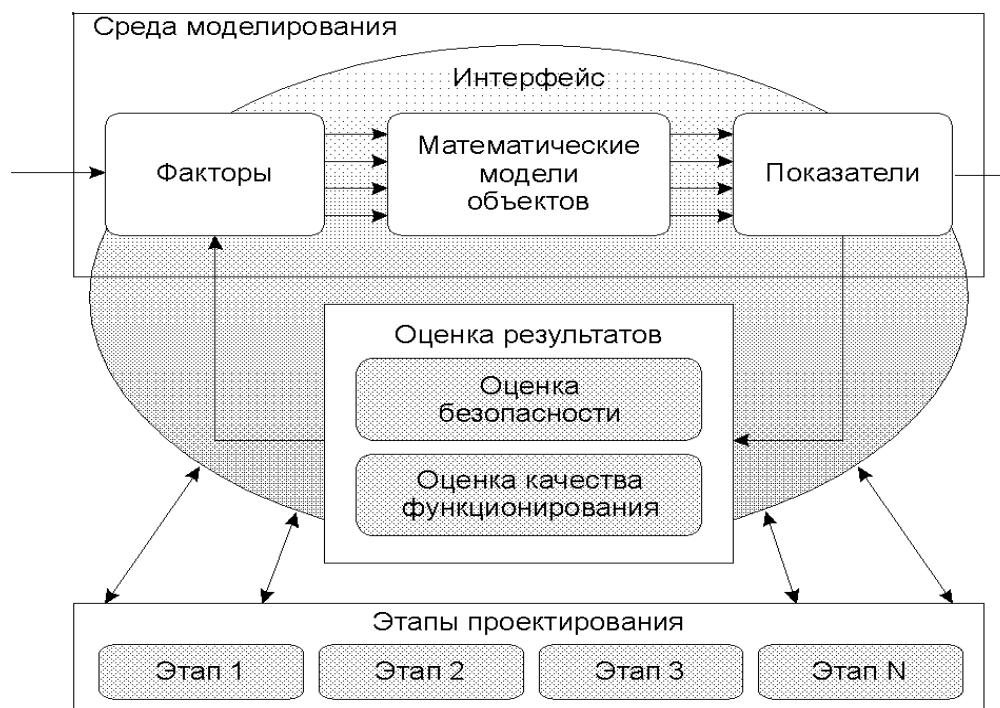


Рис. 1 Структура единой среды моделирования

Для ввода параметров волнения и ветра также предусмотрены соответствующие вспомогательные блоки. Важным элементом системы является блок задания алгоритмов управления. Интерфейс этого блока должен предусматривать удобный способ задания как коэффициентов стандартных, линейных алгоритмов, так и механизм для быстрого оперативного задания нелинейных алгоритмов нестандартной структуры.

В третьем блоке единой среды моделирования формируется совокупность показателей, подлежащих анализу (показатели ходкости, обитаемости, управляемости, динамической устойчивости и показатели для оценки прочности элементов). Полученные в результате моделирования показатели служат основой для оценки вариаций различных конструктивных элементов с точки зрения безопасности рассматриваемого транспортного средства. Указанные показатели могут быть использованы также для формирования различных критериев оценки его эффективности. На основе произведенной оценки эксплуатационных показателей проектантом производится обоснованный выбор конкретных конструктивных элементов объекта и его технических систем.

Взаимодействие с пользователем осуществляется с помощью специально разработанного программного интерфейса, позволяющего выполнять удобное задание факторов моделирования и исходных данных для различных элементов математической модели. Интерфейс также осу-

ществляет вывод информации на различных этапах моделирования. Разработанный программный комплекс является средством реализации предлагаемого метода повышения конструктивной безопасности высокоскоростного транспортного средства, каким и является СПК. Он состоит из отдельных исполняемых модулей:

- формирование профилей элементов крыльевых устройств;
- формирование геометрии крыльевых устройств;
- расчет гидродинамических характеристик крыльевых устройств;
- моделирование динамики СПК.

Интерфейсы первых двух модулей представлены, соответственно, на рис.2 и 3.

Разработанный программный комплекс выгодно отличается от аналогичных систем тем, что может быть использован различными пользователями без дополнительной подготовки. Это связано с тем, что пользователь избавлен от необходимости вникать во внутреннюю структуру различных моделей, включенных в систему. Ему достаточно лишь задавать различные параметры объекта. Выдача результатов производится также в наглядной и понятной форме. Следует заметить, что при таком построении среды моделирования, ее ядро – обобщенная нелинейная математическая модель – является законченным работоспособным блоком и может быть использо-

вана (при соответствующей замене интерфейса) для решения других задач, не связанных с оценкой его конструктивной безопасности. Например, указанная модель может быть с успехом исполь-

зована как ядро тренажера для подготовки судоводителей [6].

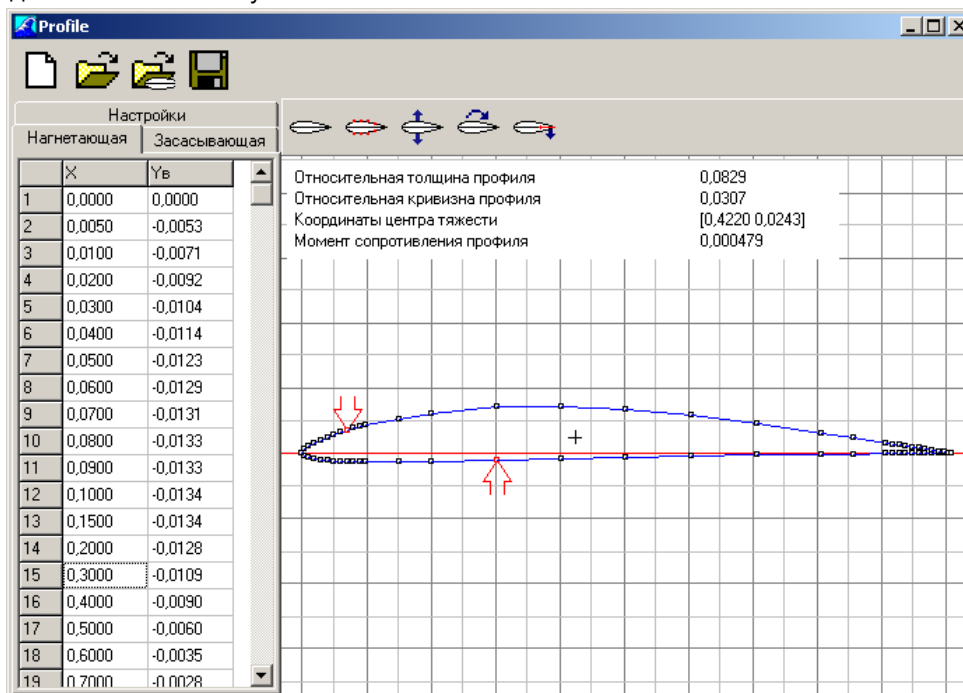


Рис. 2 Интерфейс программы формирования профилей элементов крыльевых устройств

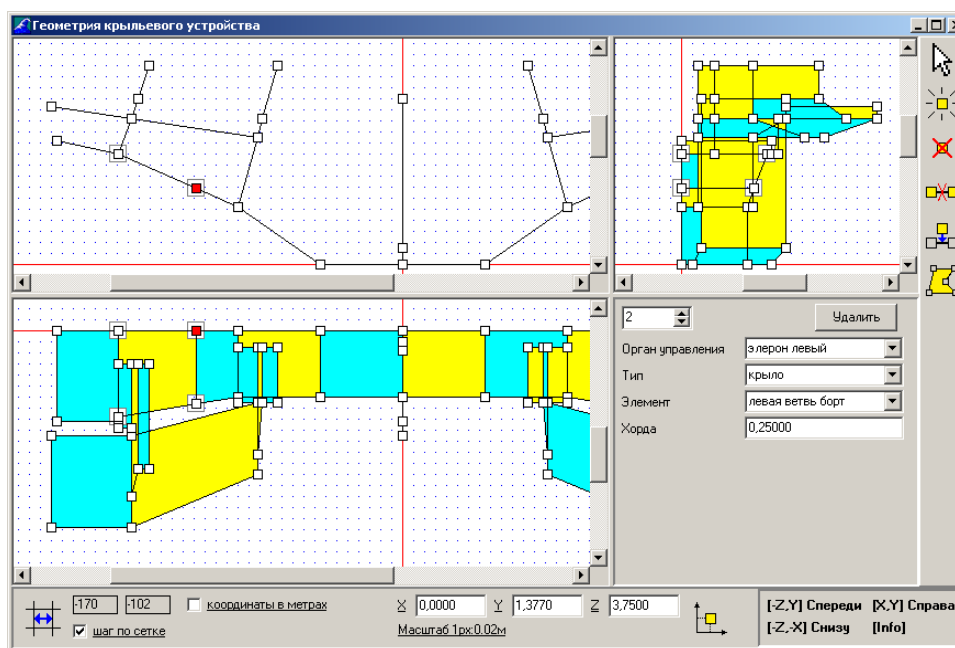


Рис. 3. Интерфейс программы формирования геометрии крыльевых устройств

### Заключение

Преимуществами представленного метода оценки конструктивной безопасности СПК на этапе его разработки являются:

- рассмотрение всего объекта в целом с отслеживанием взаимного влияния его структурных систем друг на друга;
- полное моделирование динамики рассматриваемого транспортного средства в заданных условиях внешних возмущений;
- возможность полноценной замены дорогостоящих стендовых испытаний на подробную

компьютерную модель с низкой себестоимостью и высокой производительностью;

- возможность моделирования таких условий движения, которые принципиально невозможно смоделировать в стендовых условиях (например, аварийные ситуации);
- возможность быстрого изменения любых технических, физических и геометрических пара-

метров модели (динамики приводов, алгоритма управления и т.п.) и моментального отслеживания влияния этих изменений на динамику движения рассматриваемого объекта;

- повышение уровня оптимизации конструктивных элементов СПК.

### Благодарности

"Публикация выполнена в рамках государственного задания №8.7141.2017/БЧ Минобрнауки России"

"The research work was supported by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation (task #8.7141.2017)"

### Литература

1. Лукомский Ю.А., Стариченков А.Л. Прогнозирование устойчивости движения судов с динамическими принципами поддержания // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2004. №1 (серия «Автоматизация и управление»). С.13-17.
2. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Проблемы безопасности транспорта // Национальный журнал-каталог «Транспортная безопасность и технологии». 2005. №2(3). С.24-27.
3. Стариченков А.Л., Чернышева Т.С. Скоростной флот: как обеспечить безопасность? // Судостроение. Международный журнал. 2007. №4(129). С.51-53.
4. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Чернышева Т.С. Компьютерная технология проектирования систем управления движением высокоскоростных судов // Морской вестник. Специальный выпуск. 2007. №3(6). С.131-133.
5. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Принципы обеспечения конструктивной безопасности высокоскоростных морских и речных транспортных средств // Транспорт Российской Федерации. 2009. №2(21). С.43-45.
6. Клименков А.Г., Стариченков А.Л., Чернышева Т.С. Программное обеспечение тренажера по управлению движением судна на подводных крыльях // Гирокоспия и навигация. 2002. №3(38). С.53-54.

### References

1. Lukomskij Ju.A., Starichenkov A.L. Prognozirovanie ustojchivosti dvizhenija sudov s dinamicheskimimi principami podderzhanija // Izvestija SPbGJeTU «LJeTI». 2004. №1 (serija «Avtomatizacija i upravlenie»). P.13-17.
2. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Problemy bezopasnosti transporta // Nacional'nyj zhurnal-katalog «Transportnaja bezopasnost' i tehnologii». 2005. №2(3). P.24-27.
3. Starichenkov A.L., Chernysheva T.S. Skorostnoj flot: kak obespechit' bezopasnost'? // Sudohodstvo. Mezhdunarodnyj zhurnal. 2007. №4(129). P.51-53.
4. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Chernysheva T.S. Komp'juternaja tehnologija proektirovanija sistem upravlenija dvizheniem vysokoskorostnyh sudov // Morskoj vestnik. Special'nyj vypusk. 2007. №3(6). P.131-133.
5. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Principy obespechenija konstruktivnoj bezopasnosti vysokoskorostnyh morskikh i rechnyh transportnyh sredstv // Transport Rossijskoj federacii. 2009. №2(21). P.43-45.
6. Klimenkov A.G., Starichenkov A.L., Chernysheva T.S. Programmnoe obespechenie trenazhera po upravleniju dvizheniem sudna na podvodnyh kryl'jah // Girokopija i navigacija. 2002. №3(38). P.53-54.

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)**

УДК 629.12.03.001.63

### **ТИПОРАЗМЕРНЫЙ РЯД ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ УТИЛИЗАЦИОННЫХ КОТЛОВ**

**Алексей Глебович Даниловский**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры  
судовых энергетических установок, систем и оборудования  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: agdanilovskij@mail.ru

**Иорданов Владимир Атанасов**

кандидат технических наук, ассистент,  
ассистент кафедры судовых машин и механизмов  
Технический университет Варна, г. Варна, Болгария  
e-mail: vyordanov2@mail.ru

**Пьяз Пхио Аунг**

аспирант кафедры  
судовых энергетических установок, систем и оборудования  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: 023.pyaephyo@mail.com

**Аннотация**

Для морских транспортных судов характерна потребность в греющем паре с существенно различными параметрами: от 30 °С для обогрева балласта в зимнее время до 180 °С для подогрева тяжелого топлива для впрыска в цилиндры двигателей. В этих условиях целесообразно применение высокоэффективных отдельных схем утилизации вторичных энергоресурсов главных двигателей. Однако применение таких схем сдерживается отсутствием производства двухступенчатых утилизационных котлов (ДУК). Разработана методика проектирования типоразмерного ряда ДУК, базирующаяся на применении информационных технологий и статистического анализа потребности мирового судостроения в таких изделиях. Выбраны типовые представители однородных групп танкеров и определены характеристики базового типоразмерного ряда ДУК, включающего семь типоразмеров утилизационных котлов, обеспечивающих потребности всей совокупности танкеров в тепловой энергии без включения вспомогательных котлов на топливе. Снижаются затраты при эксплуатации танкеров и выделение парниковых газов и теплоты в окружающую среду.

**Ключевые слова:** Двухступенчатые утилизационные котлы, типоразмерный ряд, проектирование, обоснование эффективности.

### **SIZE-RANGE OF TWO-STEP RECYCLING BOILERS**

**A. Danilovsky**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Professor of the Department of Ship power plants, systems and equipment  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: agdanilovskij@mail.ru

**I. Atanasov**

Candidate of technical sciences, assistant,  
Assistant of the Department of Ship Machinery and Mechanisms

Technical University of Varna, City of Varna, Bulgaria  
E-mail: vyordanov2@mail.ru

**P. Aung**

Post-graduate student of the department  
Ship power plants, systems and equipment  
St. Petersburg State Maritime Technical University  
190008, St. Petersburg, ul. Lotsmanskaja 3  
E-mail: 023.pyaephyo@mail.com

**Abstract**

For maritime transport vessels there is a need for heating steam with significantly different parameters: from 30 ° C for heating ballast in winter to 180 ° C for heating heavy fuel when burning in engines. In these conditions, it is expedient to use highly efficient separate schemes for the recycling of secondary energy resources of the main engines. However, the use of such schemes is constrained by the lack of production of two-stage waste boilers (DUK). A methodology for design of the size range of DUK is developed, based on the use of information technology and statistical analysis of the need for world ship-building in such products. Typical representatives of homogeneous tanker groups were selected and the characteristics of the basic size range of DUK, including seven sizes of waste boilers, providing the needs of the whole set of tankers in thermal energy without the inclusion of auxiliary boilers on fuel, were determined. Reduces the costs when operating tankers and the release of greenhouse gases and heat into the environment.

**Key words:** Two-stage waste heat boilers, a series of sizes, design, justification of efficiency.

**Введение**

Особенностью морских транспортных судов является эксплуатация их двигателей на двух топливах – на дешевом тяжелом вязком мазуте на длительных ходовых режимах и на легком топливе типа ДЛ на режимах начала движения, прогрева двигателей, маневрирования и остановки. Тяжелое топливо – мазут марки М-100 требует подогрева до 150 – 155 °С. Для этой цели во вспомогательной котельной установке генерируется насыщенный пар с давлением 1 МПа и температурой 180 °С.

Одновременно для общесудовых и технологических нужд используется пар более низких параметров. Например, для подогрева тяжелых нефтепродуктов, перевозимых на танкерах, нужен пар с температурой не ниже 100 °С. Этого пара нужно много – расход топлива на вспомогательные котлы на танкере приблизительно равен расходу топлива на движение судна.

Предложены [1] развитые системы утилизации вторичных энергоресурсов СЭУ с двухступенчатыми утилизационными котлами (ДУК), позволяющие полностью отказаться от работы вспомогательных котлов на топливе на длительных ходовых режимах эксплуатации, сократить средний за рейс расход топлива на 8%, снизить массу вредных выбросов и теплоты в окружающую среду. Внедрению таких систем препятствует отсутствие производства двухступенчатых утилизационных котлов на предприятиях в РФ и за рубежом.

**1. Цели и задачи**

Нами выполняется разработка предложений по созданию типоразмерного ряда двухступенчатых утилизационных котлов для использования на отечественных судах и поставок на мировой рынок.

Для решения этой проблемы нужно решить следующие задачи:

1. Выполнить разработку универсальной модели проектирования ДУК с параметризацией в функции влияющих факторов;



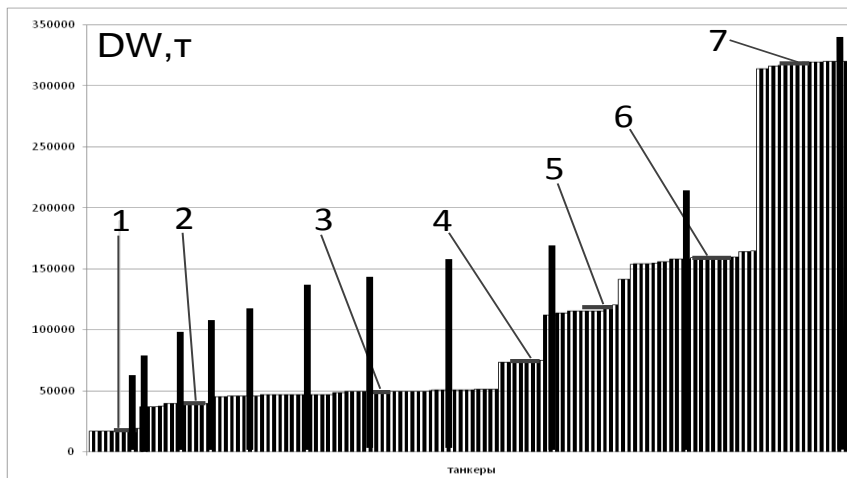


Рис 1. Танкеры, построенные в 2001 – 2013 гг., ранжированные

2. Определить характеристики альтернативных вариантов типоразмерных рядов

ДУК для удовлетворения потребностей широкого спектра судов танкерного флота;

3. Разработать предложения по созданию ограниченной номенклатуры типоразмеров ДУК для обеспечения отечественных танкеров и поставок ДУК на внешний рынок.

4. Провести сравнительный анализ альтернативных вариантов типоразмерных рядов ДУК и обоснование оптимального варианта типоразмерного ряда на основе экономического анализа.

## 2. Методы

Первая из перечисленных задач реализована [2]. Исходные данные принимаются по описанию танкера в соответствии с [3]. На основе обработки этих сборников создана база данных танкеров. В базе для каждого судна заданы марка двигателя, его номинальная мощность и коэффициент запаса мощности. В сумме это позволяет определить характеристики двигателя на режиме длительной эксплуатационной мощности (ДЭМ). С использованием программных комплексов BE и RESURSY [4] определяются удельный расход топлива, расход и температура выпускных газов на режиме ДЭМ. Принимаются диаметры испарительных труб и их

шаги в двух ортогональных направлениях для высокотемпературной (ВТС) и низкотемпературной (НТС) ступеней ДУК. Задается также в первом приближении скорость газов в трубных пучках. Она

подлежит уточнению для достижения допустимого значения сопротивления газового тракта.

По заданной скорости потока газов определяется поперечное сечение газового тракта, число рядов испарительных труб по сечению газового тракта, коэффициент теплопередачи, общая площадь испарения ВТС и число рядов труб по ходу газов.

Сечение газового тракта принимается прямоугольной формы и одинаковым для ВТС и НТС. Геометрия пучка труб НТС определяется аналогично.

Далее производится расчет сопротивления газового тракта ВТС и НТС и их суммы – общего сопротивления трубных пучков ДУК:  $H_s H_{ВТС} + H_{НТС}$ .

Значение последнего сравнивается с допустимым значением общего сопротивления. При их различии больше  $\epsilon$  производится изменение начальной скорости потока газов в большую или меньшую сторону и итерации до достижения значения  $|H_s / H_{доп} - 1| < \epsilon$ . Итерации быстро сходятся. Результаты передаются в модель объемного чертежа ДУК и используются для масштабирования конструкции.

Т /р	Дедвейт	Марка ГД	Ne МДМ	K з	G <sub>гэ</sub>	t <sub>гэ</sub>	Q <sub>ВТС</sub>	Q <sub>НТС</sub>
1	19350	6S42MC 7.1	6480	0,90	14,08	257,7	762,05	503,64
2	37790	6S46MC-C7	7860	0,90	17,03	252,7	834,3	609,16
3	47000	6S50MC	8580	0,85	19,56	231,9	540,37	699,66
4	74995	6S60MC-C	14280	0,85	30,79	231,9	850,61	1101,36
5	113900	6S60MC-C8	14280	0,90	32,3	232,7	918,87	1155,37
6	158000	6S70MC-C7	18660	0,90	44,58	232,7	1268,2	1594,63
7	319100	7S80MC-C	27160	0,90	63,66	237,7	2137,89	2277,12

Таблица 1

Параметры типовых представителей групп танкеров по дедвейту

Т /р Д УК	ВТС					НТС					H <sub>s</sub>
	1	2	F	ζ	H	Z <sub>1</sub>	2	F	ζ	H	
1.	5	6	134,0	7,70	1062,8	5	4	170,91	9,97	1298,0	2360,8
2.	9	4	150,9	7,10	979,4	9	3	205,99	9,67	1271,3	2250,7
3.		9	114,9	5,58	803,6	9	7	230,42	10,81	1481,8	2285,4
4.	8	0	185,7	5,88	822,8	8	9	366,58	11,39	1558,1	2380,8
5.	1	8	193,8	5,29	740,6	1	6	380,66	10,52	1438,2	2178,8
6.	8	9	267,5	5,58	781,7	8	8	525,3	11,10	1518,1	2299,8
7.	0	2	432,1	6,47	906,4	0	8	753,40	11,11	1504,0	2410,4

Таблица 2

Параметры тепловой поверхности двух ступеней утилизационных котлов

т/р ДУК	ВТС					НТС					H <sub>s</sub>
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	F	ζ	H	Z <sub>1</sub>	2	F	ζ	H	
1.	35	26	134,0	7,70	1062,8	35	4	170,91	9,97	1298,0	2360,8
2.	39	24	150,9	7,10	979,4	39	3	205,99	9,67	1271,3	2250,7
3.	39	19	114,9	5,58	803,6	39	7	230,42	10,81	1481,8	2285,4
4.	48	20	185,7	5,88	822,8	48	9	366,58	11,39	1558,1	2380,8
5.	51	18	193,8	5,29	740,6	51	6	380,66	10,52	1438,2	2178,8
6.	58	19	267,5	5,58	781,7	58	8	525,3	11,10	1518,1	2299,8
7.	70	22	432,1	6,47	906,4	70	8	753,40	11,11	1504,0	2410,4

В табл.1 представлены характеристики базовых танкеров, отражающих свойства группы и выбранных для проектирования типоразмерного ряда двухступенчатых утилизационных котлов. Здесь также приведены расход  $G_{га}$  и температура газов  $t_{га}$  на длительном эксплуатационном режиме и количество теплоты  $Q$ , отбираемое в двухступенчатом утилизационном котле от газов в высокотемпера-

турной и низкотемпературной секциях, полученные из их тепловых балансов.

Параметры газов на входе в утилизационный котел определяются пересчетом данных с начальной скорости движения газов в трубном пучке равном 16,5 м/с.

с

т/р ДУК	BTC					HTC					H <sub>s</sub>
	1	2	F	ζ	H	Z <sub>1</sub>	2	F	ζ	H	
1	5	6	134,0	7,70	1062,8	5	4	170,91	9,97	1298,0	2360,8
2	9	4	150,9	7,10	979,4	9	3	205,99	9,67	1271,3	2250,7
3		9	114,9	5,58	803,6	9	7	230,42	10,81	1481,8	2285,4
4	8	0	185,7	5,88	822,8	8	9	366,58	11,39	1558,1	2380,8
5	1	8	193,8	5,29	740,6	1	6	380,66	10,52	1438,2	2178,8
6	8	9	267,5	5,58	781,7	8	8	525,3	11,10	1518,1	2299,8
7	0	2	432,1	6,47	906,4	0	8	753,40	11,11	1504,0	2410,4

### 3. Результаты

Утилизационные котлы, так же как и все судовое оборудование, должны разрабатываться в виде типоразмерных рядов с определенной градацией, связанной со статистическим анализом потребителей – судов. На рис.1 представлена обработка характеристик танкеров, включенных в базу данных.

режима МДМ на режим ДЭМ с использованием программного обеспечения [3]. Температура на выходе из секции обсуждалась выше. Она на 25 – 30 °С выше температуры насыщенного пара в секции – 180 °С. Аналогично определяется количество теплоты, отбираемое от газов в низкотемпературной секции УК.

В зависимости от расхода и температуры выпускных газов двигателей представителей группы танкеров на режиме ДЭМ выполняются расчеты для определения поверхности теплообмена типоразмеров двухступенчатых котлов. Поверхности теплообмена BTC и HTC определяются как частное от деления количества теплоты, отбираемой в секции, на коэффициент теплопередачи и средний температурный напор. Последний определяется по известным температурам газов на входе и на выходе из секции и температуре насыщения воды (180 °С для BTC и 145 °С для HTC). При этом при-

няты следующие данные парообразующих трубок:  $d_n=29$  мм,  $s_1= 45$  мм,  $s_2= 43$  мм, пучек коридорный.

В табл. 2 приведены следующие характеристики поверхностей теплообмена BTC и HTC для типоразмеров двухступенчатых котлов:  $Z_1$  – число труб одного ряда;  $Z_2$  – число рядов труб;  $F$  – площадь поверхности нагрева парообразующих пучков, м<sup>2</sup>;  $ζ$  – коэффициент сопротивления поперечно-омываемых пучков;  $H$  – газодинамическое сопротивление трубных пучков

В табл. 2 общее сопротивление ДУК превышает эту величину. Для снижения сопротивления следует в итерациях уменьшить скорость движения газов. Для типоразмера 3 требуемое сопротивление двух секций утилизационного котла получено при значении

### Выводы

1. Выше приведены данные по 7 типоразмерам двухступенчатых утилизационных котлов для ступеней дедвейта, отмеченных на рис.4 цифрами от 1 до 7. Альтернативными вариантами типоразмерных рядов ДУК являются ряды основанные на рядах предпочтительных чисел – рядах Ренара R5 и R10, отмеченные на рис.4 вертикальными жирными отрезками.

Сопротивление движению газов в ДУК преодолевается за счет избыточного давления газов при выходе из главного двигателя. Разность избыточ-

ного и атмосферного давлений расходуется на преодоление сопротивления всей выпускной трассы, большая часть которого приходится на утилизационный котел.

При проектировании ДУК интенсификация теплообмена может привести к росту противодавления выпуска двигателя до недопустимой величины. В результате такого состояния начнется падать мощность двигателя, чего допустить нельзя. При проектировании типоразмеров двухступенчатых утилизационных котлов газовое сопротивление подбирается равным 0,002 МПа.

2. В дальнейшем будет выполнена проверка работы двухступенчатого УК в составе ВКУ каждо-

го из танкеров группы – сравнение по потребности в паре и возможностям базового одноступенчатого УК. Программное обеспечение для этого разработано и применялось для сравнения вариантов тепловых схем [1].

3. Методика экономического обоснования сравнительной эффективности вариантов типоразмерных рядов, построенных по разной системе градации в условиях неопределенности экономической конъюнктуры рассмотрено в работе [5]. Разработано программное обеспечение для сравнительного анализа вариантов вспомогательных котельных установок [6].

### Литература

1. Даниловский А.Г., Иванченко А.А., М'ю Чжо Ту. Анализ методов повышения эффективности судовой вспомогательной котельной установки/ Журнал университета водных коммуникаций /Судостроение и судоремонт /. СПГУВК. Выпуск 3 , 2012 г. Стр.87 – 94.
2. Пьяэ Пхио Аунг, Даниловский А.Г. Структура модели проектирования двухступенчатого утилизационного котла. Материалы всероссийской межотраслевой НТК. СПбГМТУ, 2017. С. 160 – 166.
3. Significant ships. A publication of The Royal Institution of Naval Architects, London, UK, 2001–2013.
4. Даниловский, А.Г. Проектирование судовых энергетических установок на основе САПР: учебное пособие. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2013. – 100 с.
5. Даниловский А. Г., Боровикова И. А. Автоматизированное проектирование и оптимизация судовых вспомогательных энергетических комплексов/ Монография. – СПб.: Изд. центр СПГУВК, 2008. – 220 с.
6. Даниловский, А.Г. , Боровикова И.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008614401: Оптимизация комплекта судовой вспомогательной котельной установки по согласованному критерию (RU).

### References

1. Danilovskij A.G., Ivanchenko A.A., M'o Chzho Tu. Analiz metodov povyshenija jeffektivnosti sudovoj vspomogatel'noj kotel'noj ustanovki. Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij (Sudostroenie i sudoremont ). SPGUVK. Vypusk 3 , 2012. S. 87 - 94.
2. P'jaje Phio Aung, Danilovskij A.G. Struktura modeli proektirovanija dvuhstuppenchatogo utilizacionnogo kotla. Materialy vserossijskoj mezhotraslevoj NTK. SPbGMTU, 2017. S. 160 - 166.
3. Significant ships. A publication of The Royal Institution of Naval Architects, London, UK, 2001-2013.
4. Danilovskij, A.G. Proektirovanie sudovyh jenergeticheskikh ustanovok na osnove SAPR: uchebnoe posobie. SPb.: Izd. centr SPbGMTU, 2013. 100 s.
2. Danilovskij A. G., Borovikova I. A. Avtomatizirovannoe proektirovanie i optimizacija sudovyh vspomogatel'nyh jenergeticheskikh kompleksov: monografija. SPb.: Izd. centr SPGUVK, 2008. 220 s.
6. Danilovskij, A.G. , Borovikova I.A. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2008614401: Optimizacija komplekta sudovoj vspomogatel'noj kotel'noj ustanovki po soglasovannomu kriteriju (RU).

УДК 621.224 (043)

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ПОГРУЖЕННЫХ В ВОДУ РАБОЧИХ КОЛЕС ГИДРОТУРБИН НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА В ВОЗДУХЕ

**Александр Евгеньевич Салиенко**

заместитель директора бизнес-единицы по ГТО – директор по науке и исследованиям,

Акционерное общество «Тяжмаш»

446010, г. Сызрань, ул. Гидротурбинная, д.13,

аспирант,

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

### Аннотация

В работе представлены основные стадии алгоритмов расчета собственных частот и форм колебаний рабочих колес гидротурбин в воде на основе информации о собственных колебаниях рабочего колеса в воздухе. Для вычисления матрицы присоединенных масс используется совместный метод конечных и граничных элементов.

Для уменьшения требований к вычислительным ресурсам решение проблемы в воде представлено как сумма вкладов колебаний рабочего колеса в воздухе («сухие моды»). В случае значительного различия координат узлов сетки в воде (более разряженная структура) для вычисления перемещений в узлах «смоченной» поверхности используются взвешенные значения перемещений из нескольких узлов сеточного разбиения «сухой» конструкции. Такой подход позволяет уменьшить размерность «жидких» матриц.

Использование разработанных методов аппроксимации «сухих» форм колебаний позволяет реализовать многосеточный алгоритм, который уменьшает требования к вычислительным ресурсам и сокращает время обращения «жидких матриц», которое выполняется для вычисления матрицы присоединенных масс.

**Ключевые слова:** гидротурбина, рабочее колесо, собственные частоты и формы, метод конечных элементов, метод граничных элементов, вибрации, резонансная частота.

## ALGORITHM FOR DETERMINING NATURAL FREQUENCIES AND MODES OF RUNNER OF HYDRAULIC TURBINES IN WATER BASED ON INFORMATION ON FREQUENCIES AND MODES OF RUNNER IN THE AIR

**A. Salienko**

Research and Development Director,

JSC "TYAZHMASH"

13 Hydroturbinnaya St., Syzran, Samara region, Russia, 446010

postgraduate

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

### Abstract

The paper presents the main stages of the algorithms for calculating the natural frequencies and modes the runners of the hydraulic turbines in the water on the basis of information on natural frequencies and modes of the runner in the air. Coupled boundary and finite element method are used for calculate the added mass matrix.

The solution in water is presented as the sum of the contributions of modes of the runner in air ("dry modes"). In the case of significant differences of the coordinates of the nodes of the mesh in the water the weighted values of the displacements of several nodes of the mesh of the dry construction are used for calculate displacements at the nodes of mesh the "wet" surface. This approach allows to reduce the dimensionality of the "wet" matrix.

The use of the developed methods of approximation of the "dry" mode shapes allows you to implement a multigrid algorithm, which reduces the requirements for computing resources and reduces time the operation of matrix inversion for calculate added mass matrix.

**Key words:** hydraulic turbine, natural frequencies and mode shapes, finite element method, boundary element method, vibration, resonance frequency.

**Введение**

В последнее время при модернизации ГЭС выдвигаются повышенные требования к энергетическим характеристикам проточной части гидротурбин. Это приводит к таким конструкционным решениям, которые требуют дополнительных исследований в области резонансной вибрации гидроагрегата.

В работе [1] приведено построение физико-математической модели лопасти рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины для расчета собственных частот и форм колебаний с учетом влияния жидкости. Расчетные исследования по анализу собственных частот и форм колебаний лопасти были выполнены на основе применения совместного метода конечных и граничных элементов. Далее приведены некоторые вычислительные особенности разработанных алгоритмов.

**1. Алгоритм расчета собственных частот и форм колебаний рабочего колеса в «воде»**

Для расчета собственных частот и форм колебаний конструкции в воде необходимо решить следующую задачу на поиск собственных значений:

$$(K - \omega^2(M + M_a(\omega)))U = 0, \tag{1}$$

где  $K$  и  $M$  — матрицы масс и жесткости конструкции,  $M_a$  — матрица присоединенных масс, которая формируется на основе применения МГЭ. В процессе расчета матрица присоединенных масс формируется для заданной частоты  $\omega_a$ .

Искомый вектор  $U$  можно искать в виде суперпозиции форм колебаний «сухой» конструкции:

$$U = \Psi \xi, \tag{2}$$

где  $\Psi$  — матрица собственных форм колебаний, полученная на основе применения МКЭ,  $\xi$  — вектор вкладов собственных форм «сухой» конструкции в форму колебаний конструкции в «воде». Подставляя (2) в (1) и умножая слева на транспонированную матрицу «сухих» форм колебаний, получаем:

$$(\Psi^T K \Psi - \omega^2(\Psi^T M \Psi + \Psi^T M_a(\omega_a) \Psi)) \xi = 0. \tag{3}$$

Если принять, что «сухие» собственные форму нормированы на матрицу масс, т.е. выполняются следующие соотношения:

$$\Psi^T M \Psi = I, \quad \Psi^T K \Psi = \Omega^2, \tag{4}$$

где  $I$  — единичная матрица,  $\Omega$  — диагональная матрица собственных частот, то уравнение (3) упрощается и его можно записать в виде:

$$(\Omega^2 - \omega^2(I + \Psi^T M_a(\omega_a) \Psi)) \xi = 0. \tag{5}$$

Таким образом, при вычислении собственных частот и форм колебаний конструкции, определяется вектор вкладов  $\xi$  «сухих» форм колебаний в форму колебаний смоченной поверхности. Это позволяет установить связь «сухих» форм колебаний и форм колебаний погруженной конструкции. Можно считать, что «сухая» форма колебаний, которая дает максимальный вклад в форму колебаний погруженной конструкции, будет определяющей для этой формы, а собственная частота погруженной конструкции для этой форме колебаний будет соответствовать соответствующей собственной частоте «сухой» конструкции.

Разработанный аппарат был применен для анализа причин разрушения рабочего колеса радиально-осевой турбины одной из модернизированных ГЭС. Оценка собственных частот колебаний рабочего колеса в «воде» была выполнена на основе анализа данных предыдущих расчетов и имеющегося опыта, в связи с тем, что многократные скачки угла нормалей к поверхности при переходе от лицевых поверхностей к боковым и тыльным поверхностям лопастей, а также к поверхностям обода и ступице в МГЭ могут дать непредсказуемые погрешности.

**2. Использование различных сеточных разбиений для «смоченной» поверхности и «сухой» конструкции**

Сеточные разбиения, которые используются для расчета собственных частот и форм колебаний «сухой» конструкции может отличаться от сеточного разбиения смоченной поверхности. Как правило, размер элемента сеточного разбиения «смоченной» поверхности больше или равен среднему размеру сеточного разбиения «сухой» конструкции. На рис. 1 показано сеточное разбиение рабочего колеса радиально-осевой турбины, которое использовалось при расчете соб-

ственных частот и форм колебаний «сухой» конструкции, а на рис. 2 сеточное разбиение «смоченной» поверхности.

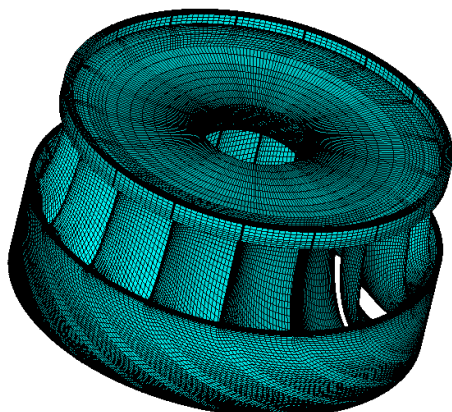


Рис. 1. Сеточное разбиение для собственных частот «сухой» конструкции

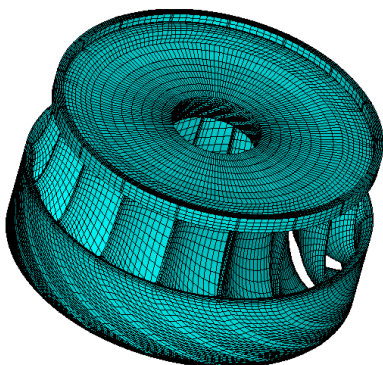


Рис. 2. Сеточное разбиение «смоченной» поверхности рабочего колеса

Для реализации алгоритма расчета собственных частот и форм колебаний рабочего колеса в воде необходимо интерполировать собственные частоты и формы колебаний «сухой» конструкции на сеточное разбиение «смоченной» поверхности. Для этого были разработаны три алгоритма.

В первом, алгоритме предполагается, что сеточное разбиение «сухой» конструкции и «смоченной» поверхности совпадает и соответствующие номера узлов имеют одинаковую нумерацию. Этот алгоритм наиболее прост в программной реализации, но не позволяет экономно расходовать вычислительные ресурсы за счет использования более крупного сеточного разбиения «смоченной» поверхности.

Во втором алгоритме в качестве значений перемещений, соответствующих собственной форме, в узле «смоченной» поверхности используется значения из ближайшего узла сеточного разбиения «сухой» конструкции. Данный алгоритм особенно эффективен, если сеточные разбиения «сухой» конструкции и «смоченной» поверхности

имеют близкие размеры элемента, но не совпадают.

В третьем варианте для вычисления значения перемещений в узлах «смоченной» поверхности используются взвешенные значения перемещений из нескольких соседних узлов сеточного разбиения «сухой» конструкции по следующей формуле:

$$\Psi_w = W\Psi, \tag{6}$$

где  $\Psi_w$  – матрица форм колебаний «сухих» собственных векторов для сеточного разбиения «смоченной» поверхности размерности  $f \times n$ ;  $f$  – число степеней свободы для узлов «смоченной» поверхности;  $n$  – число членов ряда в разложении по «сухим» формам;  $\Psi$  – матрица собственных векторов для сеточного разбиения полной «сухой» модели размерности  $s \times n$ ;  $s$  – число степеней свободы для узлов «сухой» модели;  $W$  – матрица аппроксимации, элементы которой обратно пропорциональны расстояниям до узлов «смоченной» поверхности, размером  $f \times s$ .

Третий вариант иллюстрирует (рис. 3) пример визуализации собственной формы колебаний рабочего колеса на «смоченной» поверхности (вверху) и для сеточного разбиения «сухой» конструкции (внизу).

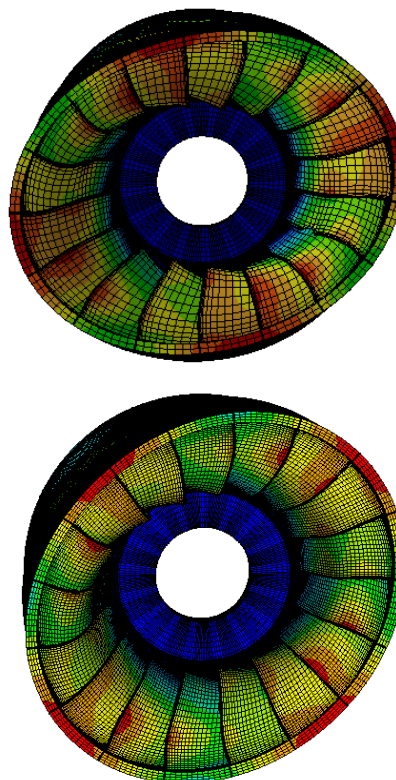


Рис. 3. Пример визуализации собственной формы колебаний рабочего колеса на «смоченной» поверхности (вверху) и для сеточного разбиения «сухой» конструкции (внизу)

Следует отметить, что предложенный алгоритм интерполяции «сухих» собственных форм колебаний на сеточное разбиение «смоченной» поверхности позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам, необходимых для получения собственных частот рабочего колеса в воде.

**Заключение**

Поведение сходимости многих методов обращения матрицы может быть значительно повышена за счет использования технологии, называемой «многосеточный алгоритм». «Многосеточный алгоритм» подразумевает проведение ранних итераций на мелкой сетки и на последующих итерациях постепенное использование более грубых виртуальных сеток. Результаты передаются обратно из грубой сетки к оригинальной более мелкой сетке (см. рис. 4).

Такой метод обходит эту проблему с помощью ряда грубых сеток, для которых большие длины волны являются малыми по сравнению с исходной сеткой.

Таким образом, использование разработанных методов аппроксимации «сухих» форм колебаний позволяет реализовать многосеточный алгоритм, что уменьшает требования к вычислительным ресурсам и сокращает время обращения «жидких матриц», которое выполняется для вычисления матрицы присоединенных масс.

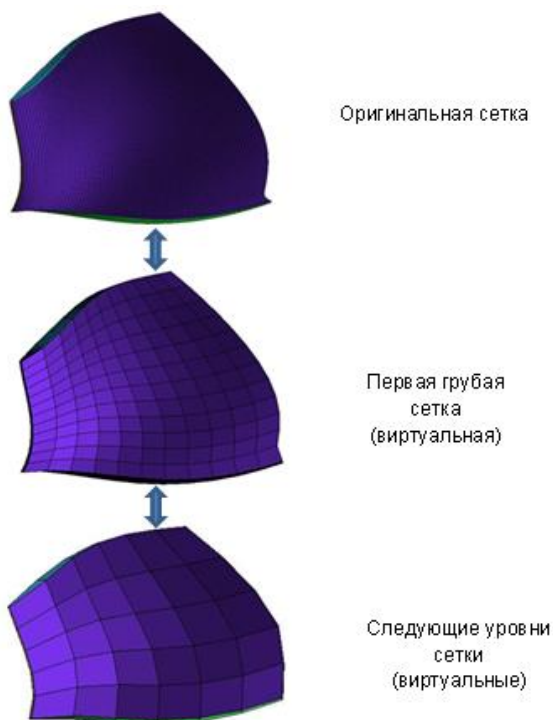


Рис. 4. Схема многосеточного алгоритма

С численной точки зрения, «многосеточный алгоритм» имеет существенное преимущество. Для заданного размера элемента, итерационные методы являются эффективными только на уменьшение ошибок, которые имеют длину волны порядка интервала сетки. В то время как более короткие волны приводят к ошибкам быстро исчезающим при выполнении итераций, то ошибки с большей длиной волны, порядка размера расчетной области, требуют выполнения итераций в течение очень продолжительного времени, чтобы их уровень стал незначительным. Многосеточ-



**Литература**

1. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Характерные особенности применения совместного метода конечных и граничных элементов к исследованию резонансных характеристик лопастных гидромашин. Морские интеллектуальные технологии, №2(36), Санкт-Петербург, 2017.

**References**

1. Zolotarevich V.P., Salienco A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Kharakternye osobennosti primeneniya sovmeznogo metoda konechnykh i granichnykh elementov k issledovaniyu rezonansnykh kharakteristik lopastnykh gidromashin. Morskije intellektual'nye tekhnologii (Characteristic features using of the coupled boundary and finite elements method to study the resonance characteristics of the hydraulic machines, Marine intelligent technologies) №2(36), Saint Petersburg, 2017.

## УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.884

### РЕШЕНИЕ ПЛОХО ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ ТРАЕКТОРНОГО ОЦЕНИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИСЦЕНАРНОГО ПОДХОДА

**Андрей Владимирович Макшанов**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительных систем и информатики  
Санкт-Петербургского государственного университета  
морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
тел. +7 (812) 748-96-92 e-mail: otd\_o@gumrf.ru

#### Аннотация

В работе рассмотрены подходы к слиянию информации от различных источников при оценивании координат и параметров движения подвижного объекта в системе виртуальных сценариев его поведения. Предложены новые конструкции фильтров, основанные на возможностях выборочного представления апостериорной плотности распределения оценки. Предлагается общий сценарный подход для последовательного анализа ситуационных гипотез, основанный на синтезе аналитической техники и процедур компьютерного моделирования для случаев, когда прямое аналитическое решение невозможно или нерационально. На основе общей концепции Монте-Карловской фильтрации предложено новое решение классической задачи локализации объекта наблюдения по результатам угломерных измерений, известной как задача «only bearings». Данная проблема сводится к плохо обусловленной задаче нелинейной регрессии, при этом на каждом шаге строится система оценок весов виртуальных сценариев поведения объекта, интерпретируемая в качестве Байесовского априорного распределения для следующего шага. На выходе фильтра появляется векторная выборка, обеспечивающая, в частности, точечную оценку и ее ковариационную матрицу. При традиционном подходе достижение разумной точности оценивания требует 3-4 достаточно продолжительных галсов наблюдателя. Предлагаемый подход уменьшает необходимое время наблюдения, обеспечивая при этом повышение точности уже на первых шагах третьего галса наблюдателя более чем на порядок.

**Ключевые слова** подвижный объект, координаты положения и параметры движения (КППД), уравнения баланса, слияние данных, эмпирический Байесовский подход, Монте-Карловские фильтры, ситуационный анализ, последовательное оценивание, полисценарный подход

### SOLUTION OF ILL CONDITIONED TRAJECTORY ESTIMATION TASK BASED ON POLYSCENARIO APPROACH

**A. Makshanov**

the professor, Dr.Sci.Tech., the professor of the department of computation systems and informatics, admiral  
Macarov state university of maritime and inland shipping of Saint-Petersburg

Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation

tel: +7 (812) 748-96-92 e-mail: otd\_o@gumrf.ru

#### Abstract

Data fusion approaches at estimating the parameters of moving object in the system of virtual scenarios of its behavior are regarded. The proposed approach describes synthesis of analytical and simulation methods for sequential situation hypothesis development when there are no variants to use suitable direct analytics. New design of filters based on sample representations of posterior density distribution is elaborated. A joined artificial techniques scenario approach for local situation hypothesis

development is regarded. New solution for classic «only bearings» task of localizing the moving object by angular observations from the moving observer based on Monte-Carlo filtration routine is proposed. The problem is reduced to ill-conditioned non-linear regression where at every step of recursion the weights estimate of virtual scenarios of objects behavior is interpreted as Bayes prior estimation at the following step. The filter output gives the vector sample that supplies in particular point estimate and its covariance. Traditional techniques supplies reasonable accuracy after 3-4 rather long tacks of the observer. The proposed techniques reduces the observation duration to first steps of the 3-th observer's tack and supplies accuracy increase for more than an order.

**Key words:** moving object, coordinates of position and motion parameters (CPMP), balance equations, data fusion, empiric Bayesian approach, Monte-Carlo filters, situation analysis, sequential estimation, polyscenario approach

**Введение**

Задача определения начальной дальности  $D_0$  и составляющих скорости  $(V_x, V_y)$  объекта по измеренным с погрешностью пеленгам  $P(t)$  при известной (с погрешностью) траектории движения наблюдателя  $\{x(t), y(t)\}$  традиционно основывается на общей системе уравнений баланса [1]. В предположении равномерного прямолинейного движения объекта слежения эти уравнения приводятся к следующему виду:

$$D_0 \sin(P_0 - P_i) + V_x(t_i - t_0) \cos(P_i) - V_y(t_i - t_0) \sin(P_i) = x(t_i) \cos(P_i) - y(t_i) \sin(P_i), \tag{1}$$

где  $P_i, x(t_i), y(t_i), i=0,1,\dots,n$  – пеленги на объект и координаты наблюдателя в моменты  $t_i$ . Оценка при этом традиционно основывается на применении метода наименьших квадратов (МНК) к непрерывно нарастающей выборке измерений с получением оценок текущих пеленгов в условиях не менее 3 галсов наблюдателя [1-5].

Перепишем (1) в виде модели линейной регрессии  $b = AZ + \varepsilon$ , где  $i$ -я строка матрицы  $A$  и  $i$ -й элемент вектора  $b$  имеют вид

$$A_i = [\sin(P_0 - P_i) \quad (t_i - t_0) \cos(P_i) \quad - (t_i - t_0) \sin(P_i)],$$

$$b_i = x(t_i) \cos(P_i) - y(t_i) \sin(P_i), \tag{2}$$

$$Z = [D_0 \quad V_x \quad V_y]^T, \quad i = 1, \dots, N.$$

Относительно вектора случайных погрешностей  $\varepsilon$  предполагается известным закон его распределения – вероятностная плотность  $p_\varepsilon(b)$  или только некоторые ее характеристики. Данная постановка относится к классу регрессионных проблем с ошибками в независимых переменных, при этом дисперсии переменных, соответствующих компонентам скорости, возрастают с ростом  $t$ . Задача состоит в улучшении статистических свойств оценки за счет снижения требований к маневрированию наблюдателя и к числу измерений пеленгов  $N$ .

**1. Эмпирический байесовский подход**

При Байесовском подходе параметр  $Z$  рассматривают как реализованное значение случайной величины с заранее известным априорным распределением  $p(Z)$ . Если информация, содержащаяся в априорном распределении, верна, то точность выводов относительно  $Z$  удастся повысить. При эмпирическом Байесовском подходе априорное распределение заранее неизвестно и само оценивается по имеющейся выборке данных [5-9].

Апостериорная плотность  $p(Z | b)$  вычисляется по формуле Байеса

$$p(Z | b) = \frac{p(Z)p(Z | b)}{\int p(Z)p(Z | b)dZ}, \tag{3}$$

где  $p(Z | b)$  – плотность вероятностей случайного вектора  $b$  в модели (1), совпадающая с точностью до математического ожидания с плотностью распределения вектора  $\varepsilon$ . Принципиальным в обоих подходах является то, что оцениванию подвергается не сама искомая величина, а ее апостериорное вероятностное распределение. В качестве точечной оценки  $Z$  обычно используется среднее, медиана или мода распределения  $p(Z | b)$ , оценка точности основывается на соответствующей характеристике рассеяния этого распределения.

В настоящее время эмпирический Байесовский подход привлекает большое внимание в связи с возросшими возможностями вычислительной техники. В работах [8,10,13] рассматриваются его варианты для нелинейных и негауссовых постановок, в [2,9] – для задач рестриктивного оценивания, в [11-13,15] – для задач рекуррентного оценивания в особо сложных схемах проведения измерений.

**2. Байесовский подход в рамках плохо обусловленной линейной модели**

Предположим, что закон распределения вектора  $b$  – нормальный со средним  $AZ$  и кова-

риационной матрицей  $\sigma^2\Omega$ , априорное распределение также нормально со средним  $Z_0$  и ковариационной матрицей  $\sigma_z^2 K_z$ . Тогда, согласно, например, [6,16], математическое ожидание байесовского апостериорного распределения (совпадающее с его медианой и модой) определяется формулой

$$\hat{z}_B = C^{-1} \left( \frac{1}{\sigma^2} A^T \Omega^{-1} b + \frac{1}{\sigma_z^2} K_z^{-1} z_0 \right), \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{\sigma^2} A^T \Omega^{-1} A + \frac{1}{\sigma_z^2} K_z^{-1}.$$

Ковариационная матрица  $K_B$  оценки  $\hat{z}_B$  приводится к виду

$$K_B = C^{-1} \cdot \frac{1}{\sigma^2} A^T \Omega^{-1} A \cdot C^{-1},$$

что всегда меньше ковариационной матрицы оценки на основе взвешенного МНК.

Для целей настоящей работы наиболее существенным является тот факт, что Байесовская оценка  $\hat{z}_B$  существует всегда, вне зависимости от того, корректна или некорректна исходная регрессионная задача. С позиций эмпирического Байесовского подхода предлагается формировать оценку рекуррентно, рассматривая на каждом шаге набор виртуальных сценариев поведения объекта слежения и прогноз его ожидаемого движения в рамках каждого из этих сценариев. Сравнение прогноза и результатов текущих измерений позволяет оценить для каждого сценария некий функционал качества  $R$ , который после нормировки интерпретируется как априорное распределение для следующего шага. Так возникает система последовательно уточняемых вероятностных распределений на множестве сценариев, из которых на любом шаге можно сформировать, например, точечные и доверительные оценки изучаемых параметров.

Данный подход можно рассматривать как частный случай крайне громоздких процедур решетчатой [8,13] и Монте-Карловской [10-13] фильтрации, разработанных для нелинейных и негауссовых постановок. Сразу следует отметить, что обоснования правомерности таких процедур основаны исключительно на асимптотических результатах, в частности, на работе Смита и Гельфанда [15]. Специфика настоящей работы состоит в использовании гауссовых аппроксимаций распределений на множестве сценариев, что позволяет за счет наличия явных формул типа (4) резко сократить объем вычислений или, соответственно, при том же объеме повысить их точность.

### 3. Траекторный фильтр на основе полисценарного подхода

Вернемся к линейной модели  $b = AZ + \varepsilon$ , где вектор результатов измерений пеленгов  $b$  и матрица  $A$  определяются соотношениями (2). Эта модель анализируется рекуррентно в пошаговом режиме, где каждый шаг соответствует поступлению очередного измерения или последовательности измерений заданной длины. Полисценарный подход в данном случае состоит в выдвижении на каждом шаге набора гипотез о значениях векторного параметра

$$Z = [D_0 \ V_x \ V_y],$$

прогнозировании для каждой гипотезы ожидаемой последовательности значений пеленгов и ее сравнении с текущими наблюдениями. Гипотезы могут представлять собой результаты перебора значений параметра  $Z$  на 3-мерной решетке или результаты случайного выбора в соответствующей 3-мерной области. В терминологии динамических систем это означает регулярный или случайный розыгрыш виртуальных состояний в стробе слежения, сформированном на предыдущем шаге. Значения меры качества (норм отклонений) после нормировки интерпретируются в терминах апостериорного распределения, которое трактуется как априорное для следующего шага.

Преимущество предлагаемого подхода состоит в том, что на каждом шаге требуются только среднее и ковариационная матрица Байесовского распределения, что позволяет либо резко сократить объем вычислений, либо повысить их точность за счет увеличения числа анализируемых сценариев. Сложность состоит в том, что на начальных шагах Байесовское распределение зачастую оказывается двухвершинным, поэтому характер сходимости сильно зависит от адекватного выбора начальных данных. В этой связи вычисления выгодно начинать только с первых шагов второго галса.

Во вполне реальном случае, когда измерения пеленгов содержат аномальные выбросы, приходится укрупнять и усреднять шаги или использовать для отклонений медианную норму вместо среднеквадратичной.

### 4. Вариант компьютерной реализации

Рассмотрим пример расчетов для следующего варианта исходных данных. Начальная дальность объекта слежения  $D=6$  (миль), скорость 5 м/с, курс  $120^\circ$ . Исходное положение наблюдателя – начало координат, скорость 10 м/с. Наблюдатель выполняет 3 галса по 360 курсами  $40^\circ, 130^\circ, 80^\circ$  соответственно. Погрешности

измерения пеленгов моделируются как гауссовы случайные величины с нулевым средним и СКО  $\sigma = 2^\circ$ . Шаг получения оценок пеленгов  $\Delta = 2$  с, однако выгоднее использовать их значения, усредненные на промежутках по 30 с.

На третьем галсе регрессионная задача (1-2) теряет свойство вырожденности, так что на этих шагах оценка КПДД должна получаться на основе обычного МНК. Тем не менее, динамика рекуррентных оценок, приведенная на рис.1, демонстрирует их крайне низкую точность даже после выполнения всех трех галсов.

Полисценарный подход (рис.2,3) реализован в следующем виде. В качестве функционала качества  $R$  на момент  $t$  выбрано евклидово расстояние между измеренной последовательностью пеленгов, поступивших к моменту  $t$ , и виртуальной последовательностью, которая должна была бы реализоваться при эмулированных значениях параметров  $D_0, V_x, V_y$ . После каждых 30 секунд наблюдения в пространстве состояний  $\{D_0, V_x, V_y\}$  эмулируется  $N$  гауссовых случайных векторов со средним и ковариационной матрицей, определяемыми разбросом значений функционала качества на предыдущем шаге. Эти  $N$  величин задают виртуальные сценарии, для каждого из которых вычисляется значение функционала качества  $R_1, \dots, R_N$ . Строится гауссова аппроксимация 3-мерного вероятностного распределения, сосредоточенного в данных  $N$  точках с весами, пропорциональными  $\exp(-R_i)$ . Соответствующие среднее и ковариационная матрица используются в качестве параметров  $z_0$  и  $K_z$  априорного распределения в формуле (4). Двумерные сечения плотности полученного апостериорного распределения для первых 30 секунд наблюдения приведены на рис.2.

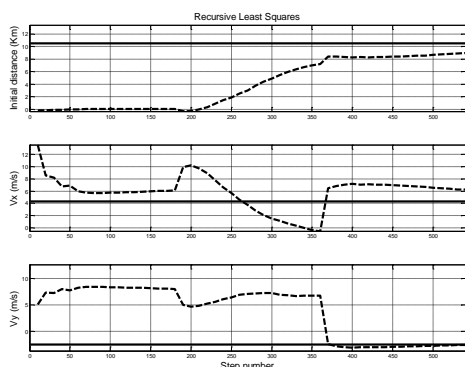


Рис. 1. Динамика рекуррентных оценок по МНК

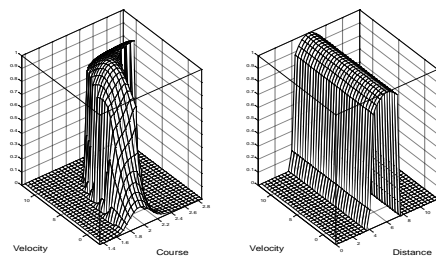


Рис.2. Сечения апостериорной плотности для первых 30 секунд

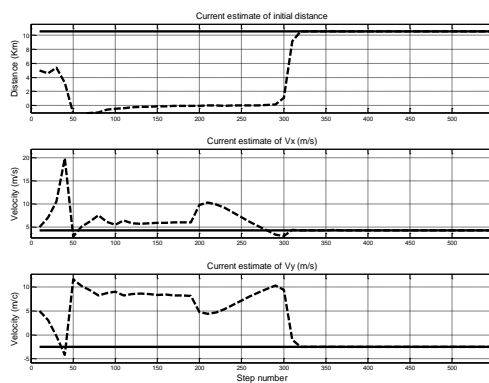


Рис. 3. Динамика рекуррентных оценок при полисценарном подходе

### Выводы

Основным преимуществом базового подхода на основе техники Монте-Карло является практически полное отсутствие ограничений на вид функций в уравнениях динамики и измерений. Наиболее ограничительное требование состоит в том, чтобы эти уравнения допускали имитационное моделирование. Недостаток данного подхода состоит в экспоненциальном росте объема вычислений.

Этот недостаток в значительной степени снимается при упрощающем предположении о равномерном и прямолинейном движении объекта слежения, так что проблема сводится к плохо обусловленной задаче нелинейной регрессии [1,3-5]. При этом на каждом шаге строится распределение виртуальных сценариев поведения объекта, используемое в качестве априорного. На выходе фильтра появляется векторная выборка, которой можно распорядиться различными способами. Например, апостериорную вероятность попадания в некоторую зону можно оценить как долю выборочных значений, попавших в эту зону.

Расчеты для различных комбинаций исходных данных показывают, что алгоритм, основанный на предлагаемом в работе варианте полисценарного подхода, уменьшает необходимое время наблюдения примерно на 16%, обеспечивая при этом повышение точности более чем на порядок.

## Литература

1. Поленин В.И. Методы и задачи определения координат и параметров движения объекта по данным ГАК подводных лодок. Монография. – СПб: ВМА им. Н.Г.Кузнецова, 2003. – 103 с.
2. Makshanov A.V. Restrictive estimation at tracking problems. – Proceedings of the International Workshop “Information Fusion and Geographic Information Systems”, SPb, Sept. 25-27, 2005, pp.182-187.
3. Макшанов А.В., Поленин В.И., Прокаев А.Н. Решение задачи определения координат положения и параметров движения объекта по данным угловых координат. – Морская радиоэлектроника, 2014, №3(49). – С.38-42.
4. Макшанов А.В., Поленин В.И., Попович Т.В. Оценивание параметров движения объекта при формировании сервисов ИГИС. – Евразийский союз ученых (ЕСУ), №5 (14), 2015. – С. 71-75.
5. Makshanov A.V., Prokaev A.N. Empirical Bayes trajectory estimation on the base of bearings from moving observer. //Information Fusion and Geographic Information Systems. Proceedings of the Third International Workshop. Springer, 2007, pp. 68-72, 182-186.
6. Cox D.R., Hinkley D.V. Theoretical statistics – London: Chapman and Hall, 1974. – 560 p.
7. DeGroot M.H. Optimal statistical decisions. – New York: McGraw-Hill Company, 1970. - 491 p.
8. Dempster A. P. A generalization of Bayesian inference. - Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 1968, Vol. 30, pp. 205-247.
9. Popovich V.V., Ermolaev V.I., Makshanov A.V., Vlasov S.A. Moving Objects Tracking in Distributed Maritime Observation Systems. // REAL CORP 2014 Proceedings. Tagundsband: Clever Plans for Smart Cities. Springer, 2014, pp. 187-196.
10. Carlin B.P., Polson N.G., Stoffer D.S. A Monte-Carlo approach to non normal and nonlinear state space modeling. – JASA, 1992, No. 87, pp. 493-500.
11. Gordon N., Salmond D., Smith A. Novel approach to nonlinear/nongaussian state estimation. – Proc. Inst. Elect. Eng., ser.F, 1993, v.40, №2, pp.107-113.
12. Doucet A., de Freitas N. (ed.). Sequential Monte-Carlo methods in practice. – New York: Springer, 2001. – 385 p.
13. Hall D.L., Llinas J. Handbook of multisensor data fusion. – Washington: CRC Press, 2001. -537 p.
14. Khaleghi B., Khamis A., Karray F.O. Multisensor data fusion: A review of the state-of-art. – Information Fusion, 2011, doi: 10.1016/j.inffus.2011.08.001, pp.1-17.
15. Smith A.F.M., Gelfand A.E. Bayesian statistics without tears: a sampling-resampling perspective. – Amer. Stat., 1992, No.46, pp. 84-88.
16. Крянев А.В., Лукин Г.В. Математические методы обработки неопределенных данных. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 216 с.

## References

1. Polenin, V.I. (2003). Metody i zadachi opredelenia koordinat i parametrov dvigania ob'ekta po dannym GAK podvodnyih lodok. (Monographya). Sanct-Petersburg, Voenno-Morskaya academia, 103 p.
2. Makshanov, A.V. (2005). Restrictive estimation at tracking problems. Proceedings of the International Workshop “Information Fusion and Geographic Information Systems”, SPb, Sept. 25-27, 2005, pp.182-187.
3. Makshanov, A.V., Polenin, V.I., Prokaev, A.N. (2014). Reshenie zadachi opredelenia koordinat pologenia i parametrov dvigania ob'ekta po dannym uglovih koordinat. Morskaia radioelektronika, 3(49), pp.38-42.
4. Makshanov, A.V., Polenin, V.I., Popovich T.V. (2015). Otsenivanie parametrov dvigania ob'ektov pri formirovanii servisov IGIS. Evraziyski soius uchenyh (ESU), 5(14), pp.71-75.
5. Makshanov A.V., Prokaev A.N. (2007). Empirical Bayes trajectory estimation on the base of bearings from moving observer. Information Fusion and Geographic Information Systems. Proceedings of the Third International Workshop. Springer, pp. 68-72, 182-186.
6. Cox D.R., Hinkley D.V. (1974). Theoretical statistics. London: Chapman and Hall, 560 p.
7. DeGroot M.H. (1970). Optimal statistical decisions. New York: McGraw-Hill Company, 491 p.
8. Dempster A. P. (1968). A generalization of Bayesian inference. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, vol. 30, pp. 205-247.
9. Popovich V.V., Ermolaev V.I., Makshanov A.V., Vlasov S.A. (2014). Moving Objects Tracking in Distributed Maritime Observation Systems. REAL CORP 2014 Proceedings. Tagundsband: Clever Plans for Smart Cities. Springer, 2014, pp. 187-196.
10. Carlin, B.P., Polson, N.G., Stoffer, D.S. (1992). A Monte-Carlo approach to non normal and nonlinear state space modeling. JASA, No. 87, pp. 493-500.
11. Gordon N., Salmond D., Smith A. (1993). Novel approach to nonlinear/nongaussian state estimation. – Proc. Inst. Elect. Eng., ser.F, v.40, No.2, pp.107-113.
12. Doucet, A., de Freitas, N., ed. (2001). Sequential Monte-Carlo methods in practice. New York: Springer, 385 p.
13. Hall D.L., Llinas J. (2001). Handbook of multisensor data fusion. Washington: CRC Press, 537 p.
14. Khaleghi B., Khamis A., Karray F.O. (2011). Multisensor data fusion: A review of the state-of-art. Information Fusion, pp.1-17.
15. Smith A.F.M., Gelfand A.E. (1992). Bayesian statistics without tears: a sampling-resampling perspective. Amer. Stat., No.46, pp. 84-88.
16. Krianev, A.V., Lukin, G.V. (2003). Matema-ticheskie metody obrabotki neopredelennyh dannyh. Moscow: PHYSMATLIT, 216 p.

УДК 001.51:007.5:[65.5+658.5.012.7]

## О СТЕПЕНИ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

**Сергей Михайлович Евсеенко**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, эксперт  
акционерное общество «Концерн «Научно-производственное объединение «Аврора» 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 15, тел. 607-56-02,  
E-mail: smevs@mail.ru

### Аннотация

При разработке сложных систем управления организационно-технологическими объектами в различной степени используются как методы централизованного, так и методы децентрализованного управления. В статье предложен метод определения степени централизации, децентрализации и сетевости управления сложными организационно-технологическими объектами, такими как корабль или производство. Предлагаются количественные меры степеней централизации, децентрализации, сетевости управления и координации принятия решений при управлении. Степень централизации многоуровневых систем предлагается определять как комплексный показатель, учитывающий четыре показателя: два параметра, характеризующих структуру с точки зрения абстрактной математической теории графов - нормализованный индекс центральности и индекс плотности графа, а также два параметра, учитывающих функции узлов сети и наличие или отсутствие главного центра принятия решений. В системах без главного центра принятия решений целесообразно оценивать степень координируемости принимаемых решений. Когда объект управления является роботом, человеком или их группой, происходит совмещение в одном узле и объекта управления и центра принятия решений. При управлении таким объектом или группой объектов могут использоваться оба метода организации управления в различных пропорциях, а в качестве основных показателей, характеризующих такие системы, целесообразно применять степень сетевости управления или индекс плотности сети, связывающей центры принятия решений. Метод основан на использовании аппарата теории графов, достижений социальной психологии при анализе работы групп, сообща выполняющих поставленное задание и с учетом функционального назначения узлов сети в системе управления. Продемонстрирована работоспособность данного метода при переходе из одной типовой структуры сети центров принятия решений в системе к другой типовой сети.

**Ключевые слова** Распределенная система, централизация управления, децентрализация управления, степень, индекс, плотность графа, сетевость, уровень управления, теория графов, робот.

## REVISITING THE DEGREE OF THE CENTRALIZATION AND DECENTRALIZATION IN ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL PROCESSES MANAGEMENT

**S. Evseenko**

PhD in Technical Sciences, senior staff scientist, expert  
"AVRORA" SCIENTIFIC AND PRODUCTION ASSOCIATION JSC  
Karbysheva str. 15, St. Petersburg 199178. Russian Federation  
Tel: (812) 607-56-02, Fax: (812) 702-59-46, e-mail: smevs@mail.ru

### Abstract

When developing complex management systems for organizational and technological objects, both centralized and decentralized management methods are used to varying degrees. This article presents the method for determining the degree of centralization, decentralization and network centricity.

ty in management of complex organizational and technological object such as vessel or manufacture. The quantitative measures for determining the degree of centralization, decentralization and network centrality and decision making in management are also provided. The degree of multilevel systems centralization is proposed to be defined as a complex indicator that combines four different indicators: two parameters characterizing the structure from the abstract mathematical graph theory point of view, which is the normalized centrality index and the graph density index, and two other parameters that consider the functions of network nodes and the presence or absence of the main decision-making center. In systems without a central decision-making center, it is appropriate to evaluate the degree of coordinability of taken decisions. When the control object is a robot, a human or a group of them, both the control object and the decision-making center are combined in one node. When managing such an object or group of objects, both methods of managing the organization can be used in different proportions, and as the main indicators characterizing such systems, it is advisable to apply the degree of network centrality degree or the density index of the network linking the decision-making centers. The present method is based on the applying the apparatus of the graph theory, on achievements of social psychology in the analysis of the work in groups performing together an assigned task and it also takes into account the functional purpose of the network nodes in the management system. The efficiency of this method has been demonstrated when moving from one typical structure of the decision-making centers network in one system to another typical network.

**Key words** Distributed system, management centralization, management decentralization, degree, index, graph density, network centrality, management level, graph theory, robot.

### Введение

От правильного определения соотношения методов централизованного и децентрализованного управления организационно-технологическими процессами таких сложных объектов управления как предприятие или корабль зависят эффективность управления, организационно-техническая структура управления, задачи и функции органов управления и центров принятия решений. При этом необходимо учитывать, что для действующих систем управления такими сложными объектами с двумя и более уровнями принятия решений присущи в различной степени как методы централизованного, так и методы децентрализованного управления. Однако до настоящего времени существует неоднозначность в понимании терминов "децентрализованная система управления", "распределенная система управления", "централизованная рассредоточенная система", «децентрализованная иерархическая система» и т.п. [1,2], нет отвечающего всем случаям организации управления объектами определения степени централизации управления [2,3].

В работе [4] была проанализирована терминология в этой области на период середины 80-х годов прошлого века, предложен подход к определению и количественная мера степени централизации управления техническими средствами кораблей и судов на основе использования теории графов и математического описания структур типовых сетей с учетом функционального назначения узлов системы управления. За прошедшее с тех пор время произошли существенные изменения в разви-

тии децентрализованного управления сложными динамическими системами [6-9], получены новые результаты в области создания распределенных систем управления организационно-технологическими процессами децентрализованного управления группой динамических объектов или роботов [8-13], усовершенствовались методы исследования сложных систем управления [14,15] и сетевых многоагентных систем [16-19], активно пропагандируется, так называемый, «сетецентризм» или «сетецентрическое управление» [21-23]. В тоже время в работе [4] недоиспользованы достижения, полученные в социальной психологии и социальной кибернетике при оценке эффективности работ групп с помощью математической теории графов [22, 23].

С учетом многих из этих нововведений в статье предложен метод определения степени централизации, децентрализации и сетецентричности управления сложными организационно-технологическими объектами, такими как корабль или производство. Предлагаются количественные меры степеней централизации, децентрализации, сетецентричности управления и координации принятия решений при управлении. Метод основан на использовании аппарата теории графов, достижений социальной психологии при анализе работы групп, сообща выполняющих поставленное задание, и с учетом функционального назначения узлов сети в системе управления. Продемонстрирована работоспособность данного метода при переходе из одной типовой струк-



туры сети центров принятия решений (ЦПР) в системе управления к другой типовой сети ЦПР.

### 1. Уточнение основных терминологических понятий

Прежде всего, уточним значения основных понятий. Несмотря на кажущуюся ясность этих понятий в литературе встречается различное толкование этих терминов и производных от них терминов.

Централизовать - это значит "сосредоточить (сконцентрировать) в одном центре, объединить в одном месте" [24]. Следовательно, слово "децентрализовать" означает "рассредоточить", т.е. "разбив или разделив на более мелкие единицы, группы, поместить, расположить каждую из них отдельно" [24]. Из этих определений следует, что понятия "централизованная система" и "децентрализованная система" являются частичными синонимами понятий соответственно, "сосредоточенная система" и "рассредоточенная система". Они являются не полными, а частичными синонимами, т.к. смысл понятия "централизованная (децентрализованная) система" или "централизованная (децентрализованная) структура" обычно дополняется топологическим пространством (топологическими пространствами), где сосредоточены (по которым рассредоточены) элементы системы или структуры [1,2,27]. Для организационно-технологических систем такими топологическими пространствами являются конструктивно законченные блоки (корпуса, стойки, пульта, приборы, модули, щиты и т.п.) и различные реальные ограниченные пространства (помещения, здания, отсеки, цеха, отделы предприятия и т.п.). Термины же "централизованное управление" и "децентрализованное управление" являются производными от понятия "централизм", под которым понимается "система управления или организации, при которой местные органы подчинены центральной власти, центру" [24], а под "центром" понимается "место сосредоточения органов управления ..." [24].

Далее мы будем учитывать, что в сложных многоуровневых системах используются как методы централизованного управления и сосредоточения в одном центральном пространстве, так и методы децентрализованного управления и рассредоточения или распределения по нескольким топологическим пространствам [28]. Таким образом, централизованное управление характеризуется сосредоточением в одном месте или в одном топологическом пространстве центра принятия решения (ЦПР) процесса управления или,

используя терминологию работ [1,2, 28], центра выработки решений в единичном контуре управления (ЕКУ). Поэтому под термином "система централизованного управления" как раз и понимается сосредоточение в одном месте центра окончательной обработки собранной информации, принятия решений и выдачи команд управления, хотя эта система может управлять объектом, представляющим собой "децентрализованную систему" в выше описанном смысле, т.е. средства измерения, предварительной обработки информации и исполнительные органы могут быть, в значительной степени, рассредоточены.

Смысл термина "децентрализованная система управления" соответствует смыслу "децентрализованная система", но при этом не ясно - какой метод управления ("централизованный" или "децентрализованный") используется в системе. Более того, систему, у которой рассредоточены элементы и центры принятия решений (ЦПР), нужно было бы назвать "децентрализованной системой децентрализованного управления", что является громоздким и неудобным, поэтому такую систему целесообразно назвать «распределенная система децентрализованного управления».

В работах [1,27] представлены основные классы структур больших систем управления (БСУ) с позиций управления, где структура, которая представлена на рис. 5 и которая соответствует "распределённой системе децентрализованного управления", некорректно названа "централизованной рассредоточенной структурой". В то же время в публикациях встречается и не совсем корректный термин – «распределённое управление» [25].

Более четко определяют свою терминологию специалисты по вычислительным системам. Так, появившиеся в конце XX века системы грид-вычислений (англ. Grid – решётка, сеть), представляющие собой форму распределенных вычислений, в которой «виртуальный суперкомпьютер» составлен в виде кластеров, соединенных с помощью сети слабосвязанных гетерогенных компьютеров, выполняющих совместно огромное количество операций для решения научных задач, требующих значительных вычислительных ресурсов [26]. Т.е. осуществляются распределенные вычисления, но не «распределенное управление». Функции ЦПР здесь возложены на территориально-распределенных по кластерам диспетчеров, которые в соответствии с алгоритмами децентрализованной диспетчеризации могут обеспечить эффективное распреде-

ление ресурсов при совместном эффективном решении сложных задач.

С конца XX века и по настоящее время существует рынок производственных распределённых систем управления (в переводе с англ. Distributed Control System, сокращенно DCS) [13]. DCS это комплекс аппаратно-программных средств и решений для построения АСУ ТП, характерной чертой которых является децентрализованная обработка данных и принятие решений в распределённых и связанных между собой ЦПР. Структура DCS, как правило, состоит из трёх уровней. Нижний уровень ввода/вывода: датчики и исполнительные механизмы (ИМ) объекта управления (ОУ). Средний уровень: контроллеры, обрабатывающие полученные данные и выдающие управляющее воздействие на ОУ. Верхний уровень: серверы баз данных и операторские пульта.

В работах, посвященных децентрализации управления сложными многосвязными динамическими системами, которые характерны для технологических процессов, решаются задачи декомпозиции централизованного управления на несколько связанных децентрализованных регуляторов, с учетом информационно-структурных ограничений, обеспечением устойчивости и компенсацией возмущений [5-7]. Основой анализа качества этих систем является исследование графов этих структур, т.е. взаимосвязи ЦПР между собой, входами и выходами системы с обеспечением управляемости и устойчивости после децентрализации.

Децентрализация систем управления группой динамических объектов состоит в передаче функций управления группой в один групповой ЦПР или в несколько ЦПР, которые управляют группой или координируют работу группы [8-12]. При этом используются как методы централизованного управления, так и методы децентрализованного управления.

По поводу ажиотажа вокруг многоагентных систем, возникшего около 20 лет назад и продолжающегося до сих пор [16-19], достаточно подробно дал объяснение Д.А. Поспелов в статье [16], где он отметил, что мы имеем приоритет наших исследований в этой области, что наш «актор» превратился в «агента», что в США термин «искусственный интеллект» уже не обеспечивал приток больших вложений, поэтому вышли новые лозунги: многоагентные системы и искусственная жизнь. Очень похожи причины появления сецентрического «бума», правда, крен его направлен в сторону милитаризма [20,22]. Но эти два относительно новых направления не имеют

какого-либо значительного практического внедрения в высокоорганизованные сложные структуры типа армии, флота, производства [22], и начались они с появлением сетевых архитектур, когда протоколы обмена стали той технологической основой, на которой начала осуществляться коммуникация между узловыми ЦПР сети [16,17,20].

Таким образом, в основе оценки всех перечисленных сетевых подходов по степени их централизации лежит структурно-функциональный анализ процессов управления.

## **2. Структурно-функциональный анализ процессов управления организационно-техническими процессами**

Будем в дальнейшем использовать типовые сети ЦПР в системах управления организационно-технологическими процессами (Рис. 1), составленные по аналогии с типовыми структурами валентности молекул химика-органика А.В. фон Гофмана и типовых сетей социальной психологии при анализе работы групп, сообща выполняющих поставленное задание [22,23], но с некоторым изменением в типовых названиях.

Используя представление процесса управления в виде иерархии слоев принятия решений, которая определена в работе [28], а также метод структурно-топологического анализа систем управления [1,27], исследуем структуры одно- и двухуровневых систем управления (рис. 2-12), и их модификации с небольшими структурными изменениями (изменено число ОУ или ЦПР, или ЕКУ, или переключение ЕКУ с одного уровня на другой) на рис. 3а, 4а, 4б, 5а, 5б, 6а ÷ 12а. На рис. 2, 4б, 5, 5а, 6 и 6а представлены структуры децентрализованного управления, у которых отсутствует главный ЦПР (ГЦПР). На рисунках 3, 3а, 4а и 4 представлены структуры процессов управления с одним ЦПР (или ГЦПР) и, соответственно, одним, двумя, тремя и четырьмя ОУ, а на рисунках 5б, 7-12а - двухуровневые структуры управления, имеющие один ГЦПР на верхнем уровне иерархии и различное число ЦПР на нижнем уровне. Любая вершина графа структуры управления (ЦПР или ОУ), соединяясь с другой вершиной (ЦПР или ОУ) образует единичный контур управления (ЕКУ), который определен в работах [1,2] и под которым понимается как замкнутый контур управления в теории автоматического управления (ЦПР ↔ ОУ), так и контур связей и координации между различными ЦПР (ЦПР ↔ ЦПР). ГЦПР в различных реальных СУ может соответствовать главному лицу, принимающему решения по управлению (ГЛПР), генеральному штабу, интеллектуальной управляющей автома-

тической системе, координатору действий группы роботов или группы агентов сети и т.п. ЦПР может соответствовать лицу принимающему решение (ЛЦПР), оператору СУ, регулятору или контроллеру многосвязной системы автоматического управления (САУ), агенту сети, должностному лицу, роботу и т.п. ОУ представляет собой либо объект технологического процесса, либо некото-

рую техническую систему или техническое средство. В соответствии с классификацией элементов структур метода структурных матриц [14] ЦПР должен представлять рефлекторно-акцепторный узел (осознающий, творческий орган), а ОУ должен представлять рецепторно-эффекторный узел (чувствительно-исполнительный орган)

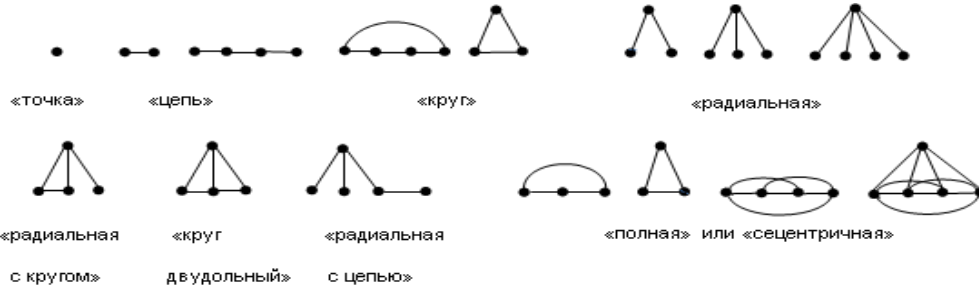


Рис.1. Типовые сети ЦПР в СУ организационно-технологическими процессами

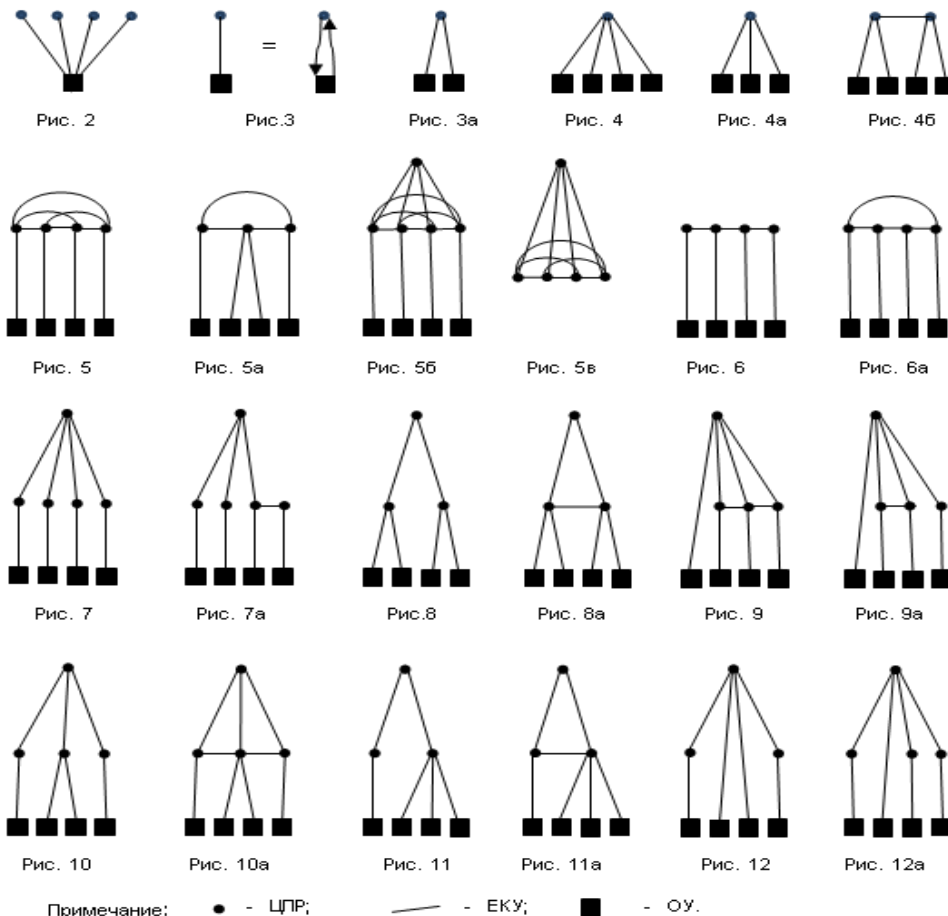


Рис. 2 + 12а. Типовые структуры СУ организационно-технологическими процессами

В случае, если ОУ является роботом, человеком или их группой (рис. 5в), то происходит совмещение в одном узле ОУ и ЦПР.

Введем следующие обозначения:

N - число вершин графа структуры – ЦПР (в т.ч. и ГЦПР) и ОУ;

R - число единичных контуров управления (ЕКУ);

$N_{ЦПР}$  - число центров принятия решений;

$N_{ОУ}$  - число объектов управления;

$R^{ГЦПР}$  - число ЕКУ, в которые входит ГЦПР;

$R_{ОУ}$  - число ЕКУ, которые входят в ОУ.

Исходные данные и результаты расчетов параметров структур управления приведены в таблице 1, где по терминологии работы [23]:

$S(G)$  – сумма расстояний (дистанций) графа G порядка N или общая сумма дистанций вершин N-ого количества вершин этого графа G;

$I(G)$  – медиана графа G или минимальная сумма дистанций некоторой вершины  $x_i$  от всех других вершин в графе G;

$C(G)$  – индекс центральности графа G равен индексу центральности его центральной точки:

$$C(G) = I(G) / S(G). \quad (1)$$

Определим неравномерность распределения ЕКУ, которая в работах [1,3,27] используется для сравнения различных структур автоматизированных систем управления (АСУ). Неравномерность распределения  $\varepsilon^2$  характеризует недоиспользование возможностей заданной структуры в достижении максимальной связанности и здесь определяется следующим образом:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^N \rho_i^2 - 2R\rho_{cp}, \quad (2)$$

где  $\rho_i$  – степень (валентность) i-ой вершины графа;

$\rho_{cp}$  – средняя степень вершин графа.

Максимальные значения неравномерности имеют избыточные по ЕКУ структуры на рис. 5б и 5в, но этот параметр не позволяет судить о степени централизации управления.

В работе [23] П. Парлеба критикует нормализованный индекс центральности  $\delta(G)$ , введенный А. Бавла в 1951 году, за неточность и ограниченность распространения метода для оценки централизации сетей. И предлагает при исследовании структур групп использовать дополнительно индекс плотности графа  $\gamma(G)$ . Однако отечественные авторы, делающие ссылки на эту работу использовали в своих исследованиях только индекс центральности [1,28]. Нормализованный индекс центральности  $\delta(G)$  определяется следующим образом:

$$\delta(G) = 2(N-1)(1-N.C(G)) / (N-2). \quad (3)$$

Значение параметра  $\delta(G)$  определяет степень радиальности структуры, т.е. степень её приближения к радиальной структуре, и неравномерность загрузки элементов структуры.

Индекс центральности, как показывает анализ результатов расчетов в таблице 1, в большинстве случаев характеризует и степень централизации управления, однако он не чувствителен ни к количеству ОУ управляемых из одного центра, ни к распределенности (децентрализации) ЦПР по уровням принятия решений в иерархических многоуровневых структурах (рис. 7-12а). Так структуры на рис. 2, 3а, 4 и 4а имеют максимальное значение индекса центральности равное "1" и в соответствии с ним они идентичны полно связной по ЦПР системе (рис. 5б), что не соответствует реальной степени централизации управления. Анализ структур процессов управления на рис. 2-12а позволяет сделать вывод о том, что термин "степень централизации (децентрализации) управления" применим только в случае управления двумя и более объектами управления. Так, неопределенность типа "0 на 0" для структуры на рис. 3 говорит о том, что она одновременно является структурой и с централизованным и с децентрализованным управлением. Для случая структуры на рис. 2 (децентрализованное регулирование независимых параметров в одном объекте управления), которая с точки зрения графа является "зеркальным отображением" структуры "полностью централизованного управления" (рис. 2, 3а, 4 и 4а), индекс центральности неприемлем, что говорит о некорректном отображении процесса управления в структуре графа.

Индекс плотности графа  $\gamma(G)$  определяется следующим образом:

$$\gamma(G) = N((N^2-1)-3S(G))/N(N-1)(N-2). \quad (4)$$

Анализ результатов показывает, что индекс плотности графа  $\gamma(G)$  характеризует степень сетцентричности управления (ССУ) или степень приближения структуры сети к полной связности узлов (рис. 5в). В порядке уменьшения  $\gamma(G)$  или ССУ (по номерам рисунков) исследуемые сети расположились следующим образом:

5в→5б→5→10а→11а→9→8а→5а→6а,9а→2,4→7→12а→12→7а→10→4б→6,11→8→4а→3а. Показатели  $\delta(G)$  и  $\gamma(G)$  характеризуют граф структуры управления без учета функционального назначения узлов графа. Введем в анализ еще два показателя, характеризующие узлы сети по их выполняемым функциям и приближенности к граничным показателям. Под максимально возможной степенью функциональной централизации систем управле-

ния организационно-технологическими объектами в исследуемом множестве структур (при максимальном  $NOY = 4$ ) предлагается понимать степень централизации структуры, изображенной на рис. 4. Тогда под функциональной степенью централизации оцениваемой структуры процесса управления ( $Z\Phi$ ) будем понимать степень приближения структуры управления к структуре со степенью централизации равной "1" и определять ее следующим образом: следующим образом:

$$Z\Phi = R^{ГЦПР} R^{-1}, \tag{5}$$

что является более корректным определением степени централизации управления, чем в известных опубликованных методах [1, 3, 34-38], однако этот подход не делает различий для одноуровневых структур при управлении разным числом ОУ.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров структур на рис. 2 ÷ 12а

№ рис.	S( G)	I( G)	C( G)	$\varepsilon^2$	$\delta(G)$	$\gamma(G)$	$Z_\Phi$	$Z_1$	$Z^U$	$Z^{КПР}$	$Z^A$
2	32	4	0,125	7,2	1	0,4	0	0	1,1	0	-0,1
3	2	1	0,500	0	0/0	0/0	1	1	0/0	0/0	0/0
3а	8	4	0,250	0,67	1	0	1	2	1	0/0	0
4	32	4	0,125	7,2	1	0,4	1	4	1,6	0/0	-0,6
4а	18	3	0,167	3	1	0,25	1	3	1,313	0/0	-0,313
4б	58	7	0,121	5,33	0,690	0,3	0	0	0,247	1	0,753
5	104	10	0,096	18	0,538	0,571	0	0	0,277	1	0,723
5а	80	8	0,100	10	0,720	0,457	0	0	0,294	1	0,706
5б	128	11	0,086	64	1	0,667	0,286	0,8	0,568	1	0,432
5в	20	4	0,200	64	0	1	0,4	0,8	0,550	1	0,45
6	136	12	0,088	5,5	0,686	0,286	0	0	0,243	0,5	0,757
6а	120	12	0,100	8	0,467	0,429	0	0	0,224	0,667	0,776
7	176	12	0,068	11,56	0,883	0,381	0,5	0,8	0,641	0,4	0,359
7а	188	14	0,074	5,56	0,754	0,310	0,375	0,6	0,510	0,4	0,490
8	96	10	0,104	5,43	0,650	0,229	0,333	0,667	0,470	0,667	0,530
8а	78	8	0,103	12	0,677	0,486	0,286	0,667	0,529	1	0,471
9	112	10	0,089	13,5	0,667	0,5	0,444	1	0,653	0,833	0,347
9а	120	10	0,083	10	0,778	0,429	0,5	1	0,677	0,667	0,323
10	134	11	0,082	5,5	0,801	0,304	0,429	0,75	0,571	0,5	0,429
10а	110	9	0,082	15,5	0,806	0,518	0,333	0,75	0,602	0,833	0,398
11	92	9	0,098	7,43	0,757	0,286	0,333	0,667	0,511	0,667	0,489
11а	76	7	0,092	14	0,853	0,514	0,286	0,667	0,580	1	0,420
12	88	8	0,091	7,43	0,873	0,343	0,667	1,333	0,804	0,667	0,196
12а	128	10	0,078	7,5	0,875	0,357	0,571	1	0,701	0,5	0,299

В работе [2] в качестве количественной меры степени централизации конкретного процесса (системы) управления предлагается принять отношение числа ЕКУ, в которых ГЦПР самостоятельно принимает решение, к общему числу точек принятия решений, содержащихся в данной структуре. Обозначим степень централизации управления в таком понимании  $Z_1$ , тогда

$$Z_1 = R^{ГЦПР} (N_{ЦПР})^{-1}. \tag{6}$$

В структурах с децентрализованным управлением (2, 4б, 5, 5а, 6 и 6а), т.е. там, где либо нет связности между ЦПР (рис. 2), либо в связанном графе не назначен ГЦПР (рис. 4б, 5, 5а, 6 и 6а) и все они в рамках данного подхода имеют

нулевую степень централизации. В дальнейшем необходимо учитывать, что этот показатель не имеет относительного характера, т.к. для структур на рис. 3а, 4, 4а и 12 его значение больше единицы.

Для оценки степени централизации управления (СЦУ) иерархических многоуровневых структур, с ГЦПР или без него, предлагается использовать комплексный показатель СЦУ -  $Z^U$ . Этот показатель учитывает два параметра, характеризующих структуру с точки зрения абстрактной математической теории графов - нормализованный индекс центральности  $\delta(G)$  и индекс плотности графа  $\gamma(G)$ , а также два параметра, учитывающих функции узлов сети  $Z_\Phi$  и  $Z$ . В

соответствии с ГОСТ 15467-79 он является комплексным показателем, а коэффициенты весомости всех 4-х составляющих показателя целесообразно принять одинаковыми, т.е. равными 0,25, тогда

$$Z^L = 0,25 (\delta(G) + \gamma(G) + Z_\phi + Z_1). \quad (7)$$

Как видно из таблицы 1, под комплексной СЦУ структуры ( $Z^L$ ), будем понимать степень приближения структуры управления к структуре сосетепеню централизации равной "1", т.е. к структуре на рис. 3а. Из двухуровневых сетей к ней наиболее близка сеть на рис. 12а, а с увеличением числа ОУ в одноуровневом управлении увеличивается и значения  $Z^L$ . При этом степень децентрализации управления (СДУ) -  $Z^D$  будем определять следующим образом:

$$Z^D = 1 - Z^L. \quad (8)$$

Тогда, в порядке уменьшения комплексного показателя СЦУ -  $Z^L$  (или в порядке повышения СДУ -  $Z^D$ ) исследуемые сети расположились следующим образом (по номерам рисунков):

4→4а→2→3а→12→12а→9а→9→7→10а→11а→10→5б→5в→8а→11→7а→8→5а→5→4б→6→6а.

Чтобы оценить различную степень связности ЦПР между собой в системах децентрализованного управления, а другими словами, различную степень координации принимаемых ЦПР

решений (СКПР), предлагается пользо-ваться сравнением разности между общим числом ЕКУ (R) и числом ЕКУ, в которые входят ОУ ( $R_{Oy}$ ), т. е. числа контуров координации [28], с числом ЕКУ, необходимым для полной связности или полной координации всех ЦПР данной структуры. Таким образом, степень координации принятия решений  $Z^{KPP}$  для различных структур управления можно определить как

$$Z^{KPP} = 2(R - R_{Oy}) (N_{ЦПР}(N_{ЦПР} - 1))^{-1}. \quad (9)$$

Для одноуровневых структур централизованного управления (рис. 3, 3а, 4 и 4а) этот показатель не имеет смысла, т.к., с одной стороны, в них нет никакой координации между ЦПР (имеется только один ЦПР), а с другой стороны они имеют максимальную степень координации всех ЕКУ в одном ЦПР. В порядке уменьшения  $Z^{KPP}$ , т.е. СКПР (по номерам рисунков), исследуемые сети расположились следующим образом (имеющие одинаковые значения параметра записаны через запятую):

4б,5,5а,5б,5в,8а,11а→9,10а→6а,8,9а,11,12→6,10,12а→7,7а→1,2→2.

В таблице 2 представлены переходы типовых топологий сетей ЦПР при различных изменениях и перенастройках исследуемых структур управления для ситуаций с уменьшением СЦУ, где при этом можно отследить изменения (уменьшение или увеличение) СКПР и ССУ.

Таблица 2

Примеры рекофигурации структур и изменения параметров

№ п /п	Изменения структуры управления	От Рис.№ к Рис. №	Переходы типовых топологий сетей ЦПР	СКП Р	СС У
Уменьшение СЦУ и повышение СДУ в одноуровневых структурах управления					
1	Введена одна координирующая связь (ЕКУ) между ЦПР не связанными напрямую	6 → 6а	«цепная»→«круг»	↑	↑
2	Исключение нескольких координирующих связей (ЕКУ) между ЦПР	5 → 6	«полная» → «цепная»	↑	↑
		5 → 6а	«полная» → «круг»	↑	↑
3	Уменьшение числа ОУ у одного ЦПР (ГЦПР)	4а → 3а	«точка» → «точка»	-	↑
		4 → 4а	«точка» → «точка»	-	↑
4	Децентрализация управления ОУ за счет введения одного ЦПР и одного ЕКУ	4 → 4б	«точка» → «цепная»	-	↓
		5а → 6а	«полная» → «круг»	↓	↓
5	Децентрализация управления четырьмя ОУ за счёт введения двух ЦПР и трех ЕКУ	4б → 6а	«цепная»→«круг»	↑	↑
Уменьшение СЦУ и повышение СДУ в двухуровневых структурах управления					
6	Исключениедвух координирующих связей (двух ЕКУ) между связанными напрямую тремя ЦПР	10а → 10	«круг двудольный» → «радиальная»	↓	↓
7	Переключение одной связи	7а → 7	«радиальная с цепью»→	=	↑

№ п /п	Изменения структуры управления	От Рис.№ к Рис. №	Переходы типовых топологий сетей ЦПР	СКП Р	СС У
	(одного ЕКУ) от ЦПР к ГЦПР		«радиальная»		
8	При исключении одной связи (одного ЕКУ) из полносвязной (или близкой к ней) структуры сети	8а → 8	«полная» → «радиальная»	↓	↓
		11а → 11	«полная» → «радиальная»	↑	↓
		9 → 9а	«круг двудольный» → «радиальная»	↓	↓
9	Децентрализация управления тремя ОУ за счет введения одного ЦПР и трех координирующих ЕКУ	11а → 10а	«полная» → «круг двудольный»	↓	↑
10	Подключение одного ЦПР к одному ОУ и к ГЦПР	12 → 12а	«радиальная» → «радиальная»	↓	↑
		12а → 7	«радиальная» → «радиальная»	↓	↑
11	Централизация низшего уровня управления с исключением одного ЦПР и одного ЕКУ	7 → 10	«радиальная» → «радиальная»	↑	↓
		10 → 11	«радиальная» → «радиальная»	↑	↓
Уменьшение СЦУ и повышение СДУ при изменении уровней структур управления					
12	Исключение ГЦПР с несколькими ЕКУ	8а → 4б	«полная» → «цепная»	↓	↓
		10а → 5а	«круг двудольный» → «полная»	↓	↑
13	Введение нижнего уровня управления с несколькими ЦПР и несколькими ЕКУ	4 → 7	«точка» → «радиальная»	-	↓
Уменьшение СЦУ и повышение СДУ при подключении к ЦПР технологических ОУ с ЕКУ					
14	Подключение к четырем ЦПР четырех технологических ОУ с ЕКУ	5в → 5б	«полная» → «полная»	-	↓

Примечание: «↓» - уменьшение значения показателя;

«↑» - увеличение значения показателя;

«=» - начальная и заменяемая структура имеют одинаковое значение данного показателя;

«-» - одна или обе структуры не определяются по данному показателю.

Системой исключительно централизованного управления можно назвать лишь одноуровневые системы с одним ЦПР (ГЦПР) (рис. 3а, 4а и 4), имеющие различное число  $N_{ou} \geq 2$ , а многоуровневые системы с ГЦПР более корректно называть системами с высокой (или низкой) степенью централизации управления, хотя некорректно принято относить к системам централизованного управления любую систему, имеющую ГЦПР.

Что же касается систем децентрализованного управления, то к ним некорректно относят любую систему, где нет ГЦПР. На самом деле, они имеют различную степень координации принимаемых решений. Поэтому термины "система централизованного" или "система децентрализованного" управления не обладают способностью классифицировать многоуровневые системы управления по степени централизации управления.

Для иерархических многоуровневых структур (рис. 5б, 5в, 7 – 12а) СКПР или  $Z^{КПР}$  ха-

рактеризует степень их децентрализованной координируемости. Если мы перенесем ГЦПР со всеми его связями на более низкий уровень принятия решений, то в структуре он будет таким же ЦПР как и все другие, выполняя роль "советчика" или "координатора", не связанного с ОУ, и тогда  $Z^{КПР}$  будет характеризовать то, насколько все ЦПР связаны между собой и "советником". В этом смысле максимальной децентрализованной координированностью из рассматриваемых структур с ГЦПР обладает схема на рис. 11а (для трех ЦПР, имеющих типовую сеть «полная» или «сетевая») и на рис. 9 и 10а (для 4-х ЦПР, имеющих типовую сеть «круг двудольный») и на рис 5б и 5в (для 5-ти ЦПР, имеющих типовую сеть «полная» или «сетевая»).

### Заключение

По проведенным исследованиям можно сделать следующие заключительные выводы:

- любой многоуровневой системе управления и организационной структуре управления присущи в различной степени как методы централизованного, так и методы децентрализованного управления;

- современные системы управления, особенно с использованием территориально распределенных и взаимосвязанных ЦПР, целесообразно называть распределенными системами управления, уточняя какой из методов, централизованный, децентрализованный или комбинированный метод управления используется в данной СУ;

- СЦУ многоуровневых систем предлагается определять как комплексный показатель, учитывающий четыре показателя: два параметра, характеризующих структуру с точки зрения абстрактной математической теории графов - нормализованный индекс центральности  $\delta(G)$  и индекс плотности графа  $\gamma(G)$ , а также два параметра, учитывающих функции узлов сети и наличие или отсутствие главного центра принятия решений  $Z_0$  и  $Z_1$ ;

- предлагаемый метод определения СЦУ, СДУ, СКПР и ССУ организационно-техно-

логическими объектами работает и может логично ранжировать одно- и двухуровневые СУ и может быть использован для оценки более многоуровневых иерархических систем управления;

- в системах без ГЦПР целесообразно оценивать степень координируемости принимаемых решений  $Z^{КПР}$ ;

- в случае, когда ОУ является роботом, человеком или их группой (Рис. 5в) происходит совмещение в одном узле ОУ и ЦПР, при управлении которым могут использоваться оба метода и их комбинации [10,12], а в качестве основных показателей, характеризующих такие системы, целесообразно применять ССУ или индекс плотности графа  $\gamma(G)$ ;

- СЦУ и СДУ не коррелируют со степенью механизации ОУ, незначительно влияют на степень автоматизации, интеллектуализации, роботизации и маирации управления организационно-технологическими процессами предприятия и корабля [29,30], и в значительной мере определяет такие качества СУ, как оперативность, надежность, живучесть и инерционность информационных процессов в СУ [1-4].

#### Литература

1. Меньков А.В., Острейковский В.А. Теоретические основы автоматизированного управления. М.: ОНИКС, 2005. 640 с.
2. Морозов В.П., Дымарский Я.М. Элементы теории управления ГАП. Л.: Машиностроение, ЛО, 1984. 333 с.
3. Ангелов А.Н., Кучерявый А.В. Методы количественной оценки организационных структур систем управления специального назначения // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. Смоленск. 2010. Т. 9. Вып. 2.
4. Евсеенко С.М. Соотношения методов централизованного и децентрализованного управления техническими средствами // Депонирована в/ч 11520 в справочно-информационном фонде, справка № 8. Реферат в УПИФ, Вып. 1. Л, 1986. серия Б. 29 с.
5. Шильяк Д.Д. Децентрализованное управление сложными системами: Пер. с англ. М.: Мир, 1994. 576 с.
6. Паршева Е.А., Лежнина Ю.А. Робастное децентрализованное управление с компенсацией возмущений нелинейными многосвязными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 6. С. 2-7.
7. Буков В.Н., Бронников А.М., Сельвесюк Н.И. Децентрализованное управление с модельной координацией составной многосвязной системой // Автоматика и телемеханика. 2009. С. 3-14.
8. Габасов Р., Дмитрук Н.М., Кириллова Ф.М. Оптимальное децентрализованное управление группой динамических объектов // Вычислительная математика и математическая физика. 2008. Том 48. № 4. С.593-609.
9. Фридман А.Я., Фридман О.В. Градиентный метод координации управлений иерархическими и сетевыми структурами // Информационно-управляющие системы. 2010. № 6. С. 13-20.
10. Галустян Н.К. Децентрализованное управление группой квадрокоптеров: Дисс. канд. тех. наук: 05.02.05 / МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2017. 107 с.
11. Каляев А.И., Каляев И.А. Метод централизованного управления группой роботов при выполнении потока заданий // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 1 (6). С. 26-35.
12. Лазарев В.М., Жданов А.А., Кушнеренко А.Е. Об опыте реализации механизмов централизованного и децентрализованного управления разнородной группировкой робототехнических комплексов [Электронный ресурс] / Научно-технический центр «Поиск ИТ». – М., 2016. URL:<http://poisk-it.ru/publish/.htm> (дата обращения 15.08.2017).
13. Распределенные системы управления [Электронный ресурс] / [Сайт «AutoWorks»]. – М., 2016. URL:<http://autoworks.com.ua/verxnie-urovni-asu-tp/raspredelennyye-sistemy-upravleniya/> (дата обращения 15.08.2017).
14. Шатихин Л.Г. Структурные матрицы и их применение для исследования систем. М.: Машиностроение, 1991. 256 с.
15. Васильев В.И., Ильясов Б.Г., Мунасыпов Р.А. Развитие структурных методов исследования сложных динамических систем // Автоматика и телемеханика. 2013. № 3. С.192-212.



16. Поспелов Д.А. Многоагентные системы – настоящее и будущее // Информационные технологии и вычислительные системы. 1998. №1. С. 14-21.
17. Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 33-46.
18. Теряев Е.Д., Петрин К.В., Филимонов А.Б. Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 7 и № 10 С. 11-21.
19. Шабунин А.Б., Кузнецов Н.А., Скобелев П.О. и др. Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО «РЖД» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 23-29.
20. Фархадов М.П., Душкин Д.Н. Сетецентрические технологии: эволюция, текущее положение и области дальнейших исследований // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 1. С. 21-29.
21. Рыжов В.А. Итсецентризм – управление сложностью [Электронный ресурс] / [Сайт С.П. Курдюмова «Сети, когнитивная наука, управление сложностью». – М., 2016. - URL: <http://spkurdyumov.ru/category/networks/> (дата обращения 15.08.2017).
22. Парыгин Б.Д. Социальная психология. Истоки и перспективы. СПб.: СПбГУП. 2010. 533 с.
23. Parlebas P. Centralite et compacit d'un graphe. Mathematiques et sciences humaines, 1972, Tome 39, P. 5-26.
24. Ожегов С.И., Шведова Н.Ю. Толковый словарь русского языка: 72500 слов и 7500 фразеол. выражений / Российская АН. Ин-т рус. Яз. М.:Азъ Ltd., 1992. 960 с.
25. Дроздова В.Г., Лошкарев А.В., Андреев А.В. Исследования эффективности алгоритмов распределенного управления межсотовой интерференцией в низходящем канале сетей LTE // Вестник СибГУТИ. 2014. № 4. С. 71-79.
26. Курносоев М.Г., Пазников А.А. Децентрализованные алгоритмы диспетчеризации пространственно-распределённых вычислительных систем // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 1(18). С. 133-142.
27. Денисов А.А., Колесников Д.Н. Теория больших систем управления. Л.: Энергоиздат(ЛО), 1982. 295 с.
28. Месарович М., Мако Д., Такакура И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
29. Евсеенко С. М., Скороходов Д. А. О степени механизации и автоматизации организационно-технологических процессов предприятия и корабля // Морские интеллектуальные технологии. 2013. № 3 (21). С. 44-50.
30. Евсеенко С. М., Скороходов Д. А. О степени интеллектуализации, роботизации и интегрированной оценки управления организационно-технологическими процессами предприятия и корабля // Морские интеллектуальные технологии. 2013. № 4 (22). С. 53-61.

#### Reference

1. Men'kov A.V., Ostreykovskiy V.A. Teoreticheskie osnovy avtomatizirovannogo upravleniya. M.: ONIKS, 2005. 600 p.
2. Morozov V.P., Dymarskiy Ya.M. Elementy teorii upravleniya GAP. L.: Mashinostroenie, LO, 1984.
3. Angelov A.N., Kucheryavyy A.V. Metody kolichestvennoy otsenki organizatsionnykh struktur sistem upravleniya spetsial'nogo naznacheniya. Matematicheskaya morfologiya. Elektronnyy matematicheskyy i mediko-biologicheskyy zhurnal. Smolensk. 2010. T. 9. Vyp. 2.
4. Evseenko S.M. Sootnosheniya metodov tsentralizovannogo i detsentralizovannogo upravleniya tekhnicheskimi sredstvami. Deponirovana v/ch 11520 v spravochno-informatsionnom fonde, spravka № 8. Referat v UPIF, Vyp. 1. L, 1986. seriya B. 29 p.
5. Shil'yak D.D. Detsentralizovannoe upravlenie slozhnyimi sistemami: Per. s angl. M.: Mir, 1994. 576 p.
6. Parsheva E.A., Lezhnina Yu.A. Robastnoe detsentralizovannoe upravlenie s kompensatsiyey vozmushcheniy nelineynymi mnogovyaznymi ob"ektami. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2011. № 6. pp. 2-7.
7. Bukov V.N., Bronnikov A.M., Sel'vesyuk N.I. Detsentralizovannoe upravlenie s model'noy koordinatsiyey sostavnoy mnogovyaznoy sistemoy. Avtomatika i telemekhanika. 2009. pp. 3-14.
8. Gabasov R., Dmitruk N.M., Kirillova F.M. Optimal'noe detsentralizovannoe upravlenie gruppy dinamicheskikh ob"ektov. Vychislitel'naya matematika i matematicheskaya fizika. 2008. Tom 48. № 4. pp.593-609.
9. Fridman A.Ya., Fridman O.V. Gradientnyy metod koordinatsii upravleniy ierarkhicheskimi i setevymi strukturami. Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2010. № 6. pp. 13-20.
10. Galustyan N.K. Detsentralizovannoe upravlenie gruppy kvadropteroz: Diss. kand. tekhn. nauk: 05.02.05 / MGTU im. N.E. Bauman. M., 2017. 107 p.
11. Kalyaev A.I., Kalyaev I.A. Metod tsentralizovannogo upravleniya gruppy robotov pri vypolnenii potoka zadaniy. Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2015. № 1 (6). pp. 26-35.
12. Lazarev V.M., Zhdanov A.A., Kushnerenko A.E. Ob opyte realizatsii mekhanizmov tsentralizovannogo i detsentralizovannogo upravleniya raznorodnoy gruppirovkoy robototekhnicheskikh kompleksov / Nauchno-tekhnicheskyy tsentr «Poisk IT». – M., 2016. URL link : <http://poisk-it.ru/publish/...htm> (seen on 15.08.2017).
13. Raspredelennye sistemy upravleniya / [Site «AutoWorks»]. – M., 2016. URL link : [URL:http://autoworks.com.ua/verxnie-urovni-asu-tp/raspredelyonnye-sistemy-upravleniya/](http://autoworks.com.ua/verxnie-urovni-asu-tp/raspredelyonnye-sistemy-upravleniya/) (seen on 15.08.2017).
14. Shatikhin L.G. Strukturnye matritsy i ikh primeneniye dlya issledovaniya sistem. M.: Mashinostroenie, 1991. 256 p.
15. Vasil'ev V.I., Ilyasov B.G., Munasyrov R.A. Razvitiye strukturnykh metodov issledovaniya slozhnykh dinamicheskikh system, Avtomatika i telemekhanika. 2013. № 3. pp.192-212.

16. Pospelov D.A. Mnogoagentnye sistemy – nastoyashchee i budushchee. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 1998. №1. pp. 14-21.
17. Skobelev P.O. Mul'tiagentnye tekhnologii v promyshlennykh primeneniyyakh: k 20-letiyu osnovaniya Samarskoy nauchnoy shkoly mul'tiagentnykh system. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2010. № 12. pp. 33-46.
18. Teryaev E.D., Petrin K.V., Filimonov A.B. Agentnye tekhnologii v avtomatizirovannykh informatsionno-upravlyayushchikh sistemakh. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2010. № 7 , № 10 pp. 11-21.
19. Shabunin A.B., Kuznetsov N.A., Skobelev P.O. i dr. Razrabotka mul'tiagentnoy sistemy adaptivnogo upravleniya resursami OAO «RZhD». Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2013. № 1. pp. 23-29.
20. Farkhadov M.P., Dushkin D.N. Setetsentricheskie tekhnologii: evolyutsiya, tekushchee polozhenie i oblasti dal'neyshikh issledovaniy. Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii. 2012. № 1. pp. 21-29.
21. Ryzhov V.A. Setetsentrizm – upravlenie slozhnost'yu / [Site S.P. Kurdyumova «Seti, kognitivnaya nauka, upravlenie slozhnost'yu». – M., 2016. - URL: <http://spkurdyumov.ru/category/networks/> (seen on 15.08.2017).
22. Parygin B.D. Sotsial'naya psikhologiya. Istoki i perspektivy. SPb.: SPbGUP. 2010. 533 p.
23. Parlebas P. Centralite et compacit d'un graphe. Mathematiques et sciences humaines, 1972, Tome 39, pp. 5-26.
24. Ozhegov S.I., Shvedova N.Yu. Tolkovyy slovar' russkogo yazyka: 72500 slov i 7500 frazeol. vyrazheniy / Rossiyskaya AN. In-t rus. Yaz. M.:Az" Ltd., 1992. 960 p.
25. Drozdova V.G., Loshkarev A.V., Andreev A.V. Issledovaniya effektivnosti algoritmov raspredelenogo upravleniya mezhsotovoy interferentsiy v nizkhodyashchem kanale setey LTE . Vestnik SibGUTI. 2014. № 4. pp. 71-79.
26. Kurnosov M.G., Paznikov A.A. Detsentralizovannyye algoritmy dispetcherizatsii prostranstvenno-raspredelennykh vychislitel'nykh system. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. № 1(18). pp. 133-142.
27. Denisov A.A., Kolesnikov D.N. Teoriya bol'shikh sistem upravleniya. L.: Energoizdat(LO), 1982. 295 p.
28. Mesarovich M., Mako D., Takahara I. Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem. M.: Mir, 1973. 344 p.
29. Evseenko S. M., Skorokhodov D. A. On the degree of mechanization and automation of organizational and technological processes on an enterprise and ship. Marine intellectual technologies. 2013. № 3. pp. 44-50.
30. Evseenko S. M., Skorokhodov D. A. On the degree of intellectualization, robotization and integrated evaluation of organizational and technological processes on an enterprise and ship. Marine intellectual technologies. 2013. № 4. pp. 53-61.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

УДК 678.686: 66.047.3.086.2

**ОТВЕРЖДЕНИЕ ЭПОКСИДНОГО КЛЕЯ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ  
ПОЛЕ****Ирина Владимировна Баранец**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
ФГУП «НИИСК»  
198035, Санкт-Петербург, ул. Гапсальская, 1  
e-mail: baranets@mail.ru

**Алексей Владимирович Краснов**

заместитель начальника отдела  
АО «Концерн «МПО-Гидроприбор»  
194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24  
e-mail: clepto@inbox.ru

**Федор Федорович Легуша**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: legusha@smtu.ru

**Сергей Иванович Пугачев**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
АО «Концерн «МПО-Гидроприбор»  
194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24  
e-mail: spugachev@bk.ru

**Евгений Юрьевич Рытов**

кандидат технических наук, доцент кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: physics\_spbmtu@mail.ru

**Иосиф Михайлович Старобинец**

начальник отдела перспективных технологий  
ОАО «Водтрансприбор»  
197342, Санкт-Петербург, ул. Сердобольская, 64  
e-mail: iosif@vtp.ru

**Мария Михайловна Шаланова**

научный сотрудник  
ФГУП «НИИСК»  
198035, Санкт-Петербург, ул. Гапсальская, 1

**Аннотация**

Объект исследования – процесс отверждения клея на основе эпоксидной смолы воздействием сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля. Цель работы – сокращение продолжительности отверждения клея, применяемого для сборки составных пьезокерамических преобразователей гидроакустических систем. Представлена принципиальная технология отверждения клея воздействием СВЧ электромагнитного поля, включающая использование «стартового диэлектрика» – вспученного вермикулита и предварительное нанесение на субстрат порошкового полимерного покрытия на основе эпоксидной смолы. Впервые установлено значительное сокращение продолжительности отверждения эпоксидного клея при воздействии СВЧ электромагнитного поля по сравнению с традиционной технологией. Приведены и обсуждены результаты исследования структуры клея, отвержденного по традиционной технологии и воздействием СВЧ электромагнитного поля, методами оптической микроскопии и инфракрасной спектроскопии. Показано, что воздействие СВЧ поля не приводит к изменению структуры и температуры стеклования клея. Представлены и обсуж-

дены результаты механических испытаний соединений клей – металл, полученные по традиционной и СВЧ - технологии отверждения клея. Установлено, что воздействие СВЧ поля не снижает адгезионную прочность соединений адгезив – субстрат и приводит к существенному уменьшению разброса ее значений.

**Ключевые слова:** составной пьезокерамический преобразователь, отверждение клея, СВЧ электромагнитное поле, физические методы анализа, адгезионная прочность.

## MICROWAVE HARDENING OF THE EPOXY ADHESIVE

### I. Baranets

Cand. Sci. Tech., the leading Researcher FSUE «NIISK»  
1, Gaspalskaya Str., 198035, St. Petersburg, Russian Federation  
e-mail: baranets@mail.ru

### A. Krasnov

The Head of department JSC «Concern «SUW – Gidropribor»  
24, Bolshoj Sampsonievskij Str., 194044, St. Petersburg, Russian Federation  
e-mail: clepto@rambler.ru

### F. Legusha

Prof., Dr. Sci. Phys.-Math. State marine technical university of St. Petersburg,  
3. Lotsmanskaya Str., 190121, St. Petersburg, Russian Federation  
e-mail: legusha@smtu.ru

### S. Pugachev

Prof., Dr. Sci. Tech., the leading Researcher JSC «Concern «SUW – Gidropribor»  
24, Bolshoj Sampsonievskij Str., 194044, St. Petersburg, Russian Federation  
e-mail: spugachev@bk.ru

### E. Rytov

Cand. Sci. Tech., the senior lecturer State marine technical university of St. Petersburg,  
3, Lotsmanskaya Str., 190121, St. Petersburg, Russian Federation  
e-mail: physics\_spbmtu@mail.ru

### I. Starobinets

Head of Department of promising technologies JSC «VODTRANSPRIBOR»  
64, Serdobolskaya Str., 107342, St. Petersburg, Russian Federation  
e-mail: iosif@vtp.ru

### M. Shalanova

Research Officer FSUE «NIISK»  
1, Gaspalskaya Str., 198035, St. Petersburg, Russian Federation

### Abstract

The object of study is a process for hardening an epoxy-based adhesive by microwave electromagnetic field. The study was aimed at a lesser cure time of adhesive used in assembling components of sonar system piezo-ceramic transducers. The basic technology has been presented for epoxy adhesive curing through microwave electromagnetic field, including the use of "start dielectric"—swollen vermiculite -- and precoating the substratum with epoxy-based polymer powder. For the first time a quite shorter cure time of epoxy-adhesive has been evidenced when using microwave electromagnetic field, as compared to the conventional cure technology. The results of studying adhesive structures via optical microscopy and IR spectrometry have been presented and discussed for the both ways of hardening. The microwave electromagnetic field has been shown to influence neither the structure nor glass transition temperature of adhesive. The results of mechanical tests for adhesive-metal bond strength have been also presented and discussed for the above two hardening procedures. It is stated that the action of microwave electro-magnetic field does not reduce support-adhesive bond strength and does not result in a noticeable variance in its values.

**Key words:** composite piezo-ceramic transducer, epoxy resin, adhesive hardening, microwave electromagnetic field, analytical physical methods, bond strength.

### Введение

Качество соединения активных и пассивных элементов составного гидроакустического преобразователя посредством клеящих масс на основе эпоксидных смол в значительной степени определяет эксплуатационные характеристики и надежность преобразователя. В настоящее время наиболее распространенной клеящей массой является эпоксидный клей ДМ-5-65 [1]. Характеристики клея ДМ-5-65 формируются в процессе его отверждения, которое в промышленности осуществляется выдержкой клея при температуре 65°C в течение 48 часов или при температуре 80°C в течение 24 часов. Большая длительность процесса существенно увеличивает сроки изготовления преобразователя, что определяет актуальность проведения работ по сокращению времени отверждения клея. Работами отечественных и зарубежных исследователей показана эффективность воздействия на процесс отверждения полимеров силовых электрофизических полей: ультразвуковых, электрических, электромагнитных. В то же время механизм воздействия этих полей изучен недостаточно. В работе в качестве силового электрофизического поля выбрано электромагнитное поле сверхвысокой частоты (СВЧ).

#### 1. Описание эксперимента

Известно [2], что под **отверждением** полимеров понимают действие, в результате которого происходит необратимое превращение жидких реакционноспособных олигомеров и (или) мономеров в твердые неплавкие и нерастворимые сетчатые полимеры. Процесс отверждения протекает с участием специальных отвердителей или в результате взаимодействия реакционноспособных групп олигомеров между собой под действием энергетических полей: теплового, светового, электрического, магнитного и т.д. [3-6]. В зависимости от химического строения олигомеров и (или) мономеров рассматриваемый процесс может протекать по механизму *поликонденсации* (отверждение фенолформальдегидных смол) или *полимеризации* (отверждение полиэфирных смол). В ряде случаев в одном процессе могут сочетаться оба механизма (отверждение эпоксидных смол ангидридами кислот в присутствии катализаторов – третичных аминов).

Как показали предварительные эксперименты, для разработки рассматриваемой технологии может быть использована микроволновая печь типа МС7846UQ фирмы LG. Печь имеет систему регулирования выходной мощности, при этом

максимальная выходная мощность составляет 900 Вт.

Важной особенностью принципиальной технологии явилось помещение в рабочую камеру печи, наряду с обрабатываемым адгезивом и субстратом, материала с высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь («стартового диэлектрика»), в качестве которого был применен вспученный вермикулит.

Предварительные эксперименты показали также, что эффективное отверждение в СВЧ поле выбранного адгезива на подложке из сплава АМг6, используемого во многих случаях для изготовления пассивных элементов составного пьезокерамического преобразователя, обеспечивается при нанесении на подложку порошкового полимерного покрытия марки ПЭП-91, в состав которого входит эпоксидная смола типа ЭДЛ, отвердитель – модифицированный дициадиамид, наполнитель и пигмент. (Нанесение покрытия ПЭП-91 производилось согласно ОСТ 5.9715-89).

Последующими экспериментами было установлено, что технологическими параметрами, определяющими воздействие СВЧ поля на формирование адгезионного соединения в системе ДМ-5-65 – ПЭП-91 – АМг6 (рис. 1), являются:

- генерируемая СВЧ мощность электромагнитного поля  $P$ , Вт;
- общая продолжительность СВЧ обработки  $\tau$ , мин;
- число циклов СВЧ обработки  $n$ ;
- продолжительность одного цикла СВЧ обработки  $t$ , мин;
- общая продолжительность остывания отвержденных образцов  $t_1$ , мин
- число циклов остывания образцов  $n_1$ .

Технологические параметры СВЧ обработки имели следующие значения:

$$P = 900 \text{ Вт}, \tau = 7 \text{ мин.}, n = 1, t = 1, t_1 = 120 \text{ мин.}, n_1 = 1.$$

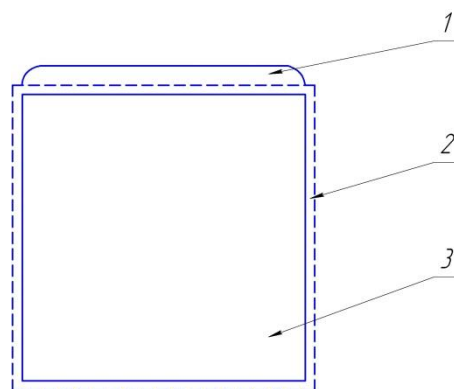


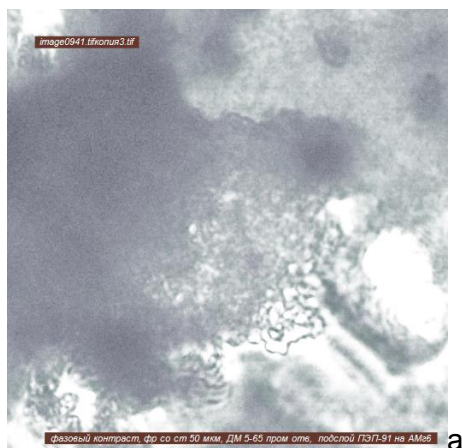
Рис. 1. Элементы адгезионного соединения: 1– клей ДМ-5-65, 2 – покрытие ПЭП-91, 3 – сплав АМг6.

На отвержденных образцах клея определялась, в соответствии с ГОСТ 9012-59, твердость по Бринеллю. Ее значения для образцов клея, отвержденных по традиционной технологии и при воздействии СВЧ поля, составили соответственно 29,7 и 30,4 кг/мм<sup>2</sup>. Это, с одной стороны, свидетельствует о качественном отверждении, а с другой, - о некотором превышении твердости для образцов, отвержденных при воздействии СВЧ поля.

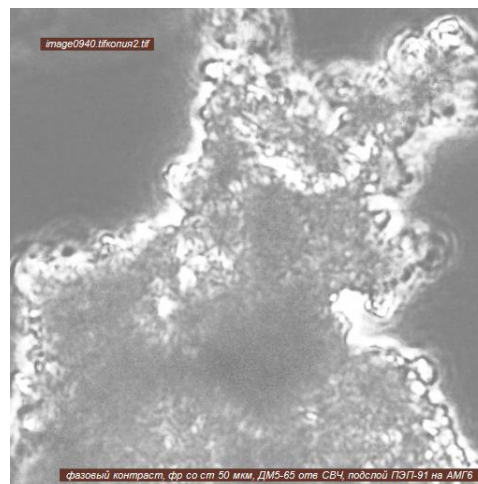
## 2. Результаты и их обсуждение

**Микроструктурный анализ.** Исследовалась морфология образцов клея, отвержденного на подслое ПЭП-91, в зависимости от способа отверждения. Для анализа использовался приборный комплекс на базе микроскопа марки Leica DM-2500, цифровой камеры высокого разрешения Leica DEC-420C и специализированной компьютерной станции. Захват, архивирование и количественная обработка изображений реализовались с помощью программного обеспечения Leica Las. В связи с высокой степенью отверждения клея не удалось получить протяженные плоскопараллельные слои в качестве препарата для исследования. Поэтому исследования проводились на фрагментах слоев клея, которые анализировались на просвет в режимах светлого поля, фазового контраста и скрещенных николей. Результаты исследования в виде микрофотографий размерами 50x50 мкм, полученные в режиме фазового контраста для клея ДМ-5-65, представлены на рисунке 2. Установлено, что в обоих случаях матрица клея характеризуется зернистой структурой.

Принципиальных отличий в морфологии срезов, полученных на разной глубине от поверхности образцов, не обнаружено. Типичные размеры зерен матрицы в пределах каждого образца варьируются от 0,3 до 0,7 мкм и не зависят существенно от технологии отверждения.



а



б

Рис. 2. Микроструктура клея ДМ-5-65, отвержденного по различным технологиям:  
а – традиционная технология;  
б – отверждение в поле СВЧ.

Наряду с микроскопическим анализом, образцы отвержденного клея исследовались на дифференциальном сканирующем калориметре DSC фирмы Perkin Elmer в диапазоне температур от – 80 до + 150°С. Установлено, что варьирование режима отверждения клея ДМ-5-65 не приводит к существенным изменениям температуры стеклования: при отверждении клея в поле СВЧ температура стеклования ниже соответствующей температуры при традиционной технологии отверждения в пределах ошибки эксперимента.

**Инфракрасная (ИК) спектроскопия.** ИК спектроскопия – метод прямой регистрации полос поглощения, характерных только для полимера данного типа [7,8]. Во многих случаях только по ИК- спектру можно сделать однозначный вывод о свойствах анализируемого объекта. Этот метод не является разрушающим и не приводит к утрате исследуемого образца. В промышленности и в практике научных исследований основное применение находят ИК Фурье спектрометры со специализированными приставками, основанными, например, на методе нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), использующими ИК-микроскоп и ряд других приборов [9]. В настоящей работе применялся ИК-Фурье спектрометр Spectrum 100 с приставкой НПВО и ИК-микроскоп FT-IR Microscope фирмы Perkin Elmer (США) [10].

Специфика метода предъявляет особые требования к экспериментальным образцам по толщине, которая должна составлять не менее 3-3,5 мм. Для изготовления требуемых образцов клея была изготовлена специальная форма из сплава АМг6 (рисунок 3).

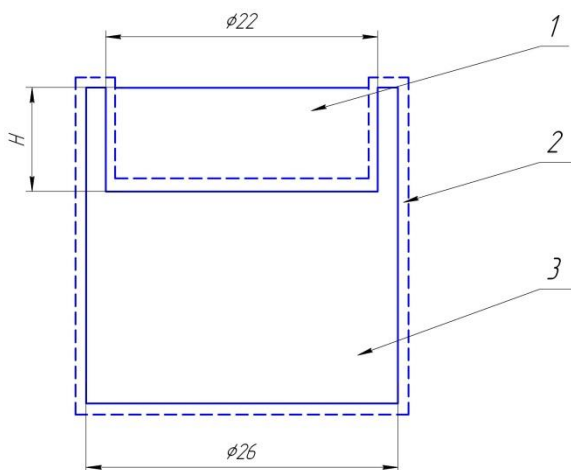


Рис. 3. Форма для отверждения образцов клея ДМ-5-65 большой толщины.

Обозначения 1,2,3 аналогичны обозначениям рис.

1.

Предназначенный для отверждения клей заливался в полость глубиной  $H$ , которая в экспериментах варьировалась в пределах 5...15 мм. Соответственно обрабатывался режим СВЧ отверждения образцов клея.

Так, при  $H = 6$  мм режим отверждения клея в СВЧ поле характеризовался следующими значениями технологических параметров:

$P = 720$  Вт,  $\tau = 3$  мин.,  $n = 6$ ,  $t = 0,5$  мин.,  $t_1 = 121$  мин.,  $n_1 = 6$ .

После механической обработки были получены образцы отвержденного клея в форме дисков  $\varnothing 22 \times 3,5$  мм, отвержденные по традиционной технологии и в СВЧ поле. Результаты анализа в виде зависимости пропускания  $T$ , % от волнового числа  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$  представлены на рис. 4. Сравнительный анализ спектров, полученных для образцов клея, отвержденного по рассматриваемым технологиям, показывает их идентичность. Некоторые отличия представляет область, выделенная эллипсом, анализируя которую можно предположить, что при воздействии СВЧ поля температура образцов была несколько выше, чем при отверждении по традиционной технологии.

Завершая этот раздел исследования, отметим, что в реальных клеевых соединениях тол-

щина слоя клея составляет доли миллиметра. Поэтому наиболее важны технологические параметры СВЧ поля, при которых достигается высокая степень отверждения именно для тонких слоев. Такая ситуация реализуется при склеивании металлических «грибков», которые после отверждения клея подвергаются механическим испытаниям на разрыв. Результаты этих испытаний позволяют получить ответы на два вопроса: 1) Какова получаемая при этом адгезионная прочность соединений клей – металл? и 2) Каков разброс значений адгезионной прочности в партии образцов?

*Определение адгезионной прочности соединений.* Адгезионная прочность соединений активных и пассивных элементов составного пьезокерамического преобразователя в значительной степени определяет надежность его работы в рабочем режиме. Учитывая, что соединение этих элементов производится посредством клея ДМ-5-65, физико-механические характеристики клея и его адгезионная прочность играют важную роль в технологии изготовления преобразователей. Адгезионную прочность соединений определяли по результатам механических испытаний на разрыв грибков из сплава АМгб, соединенных клеем ДМ-5-65, отвержденным по традиционной и СВЧ технологиям. Как указывалось выше, предварительно на поверхность грибков наносился слой полимерного порошкового покрытия ПЭП-91. Грибки с нанесенным на контактные поверхности клеем помещались в специальное приспособление, в котором выдерживались в течение всего времени отверждения клея под заданным механическим давлением. По традиционной технологии отверждения приспособление с грибками выдерживалось в электропечи сопротивления при температуре  $80^\circ\text{C}$  в течение суток. Для оценки влияния СВЧ поля на процесс создания адгезионного соединения грибки с нанесенным на контактные поверхности клеем помещали в микроволновую печь и подвергали воздействию СВЧ поля при следующих значениях технологических параметров:  $P = 900$  Вт,  $\tau = 0,25$  мин.,  $n = 1$ ,  $t = 0,25$  мин.

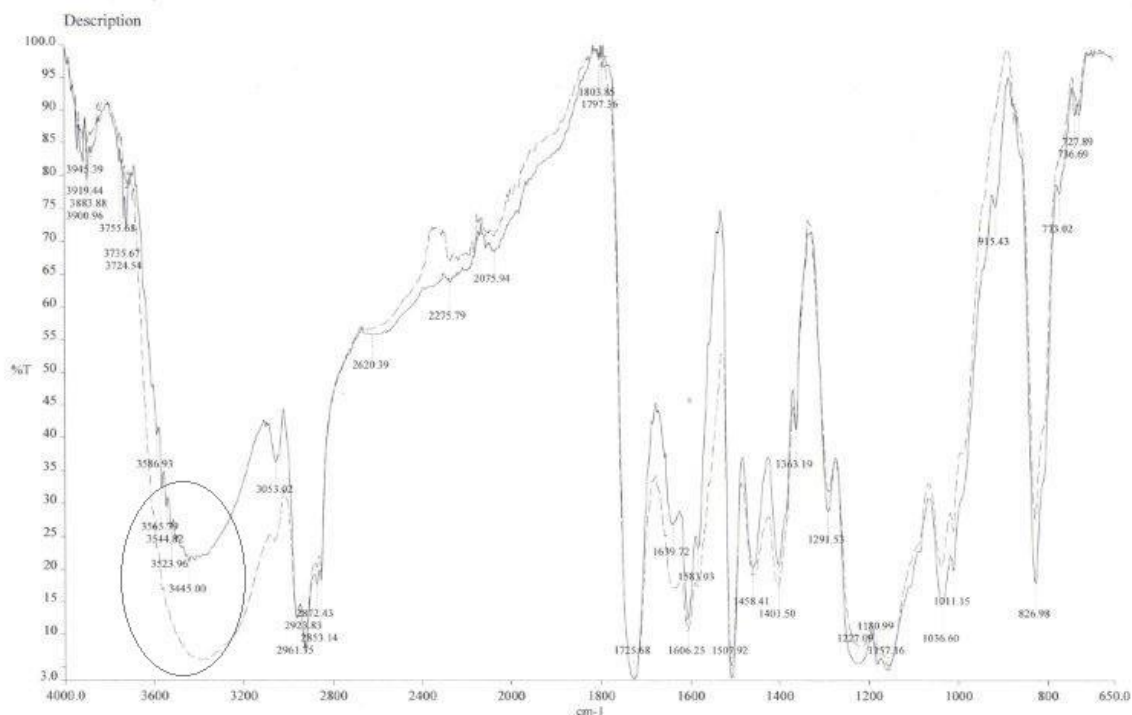


Рис. 4. ИК- спектры пропускания эпоксидного клея ДМ-5-65.

Сплошная кривая – отверждение по традиционной технологии, пунктирная кривая – отверждение в СВЧ поле

Затем грибки устанавливали в специальное приспособление и подвергали нагреву в электропечи сопротивления по режиму традиционной технологии. После отверждения клея грибки, склеенные по традиционной технологии и прошедшие предварительную обработку в СВЧ поле, подвергали механическим испытаниям на разрыв. Испытания проводились по ГОСТ 14760 на универсальной испытательной машине Р-5, шкала - 500 кг, скорость движения захвата - 10 мм. Результаты испытаний представлены в таблице 1 (образцы 1 – 4 изготовлены с по традиционной технологии отверждения клея ДМ-5-65; образцы 5 – 8 – отверждением в СВЧ поле).

### Заключение

Выбранное СВЧ оборудование с использованием схемы «стартового диэлектрика» обеспечивает ускоренное отверждения клея ДМ5-65 на образцах из сплава АМг6, применяемого для изготовления пассивных элементов составных пьезокерамических преобразователей. Эффективная СВЧ обработка достигается при предварительном нанесении на сплав АМг6 порошкового полимерного покрытия ПЭП-91.

Таблица 1

Определение адгезионной прочности соединений

Но- мер об- разца	Разрушаю- щая нагрузка Р, кгс	Предел прочности на разрыв σ, МПа	Характер разрушения
1	1650	33,7	Граница раздела ДМ-5-65 – ПЭП-91
2	1330	27,2	Граница раздела ДМ-5-65 – ПЭП-91
3	1200	24,5	Граница раздела ДМ-5-65 – ПЭП-91
4	1200	245	Граница раздела ДМ-5-65 – ПЭВ-91
	<b>Р<sub>ср</sub> = 1350</b>	<b>σ<sub>ср</sub> = 27,5</b>	
5	1260	25,7	Граница раздела ДМ-5-65 – ПЭП-91
6	1350	27,6	Граница раздела ДМ-5-65 – ПЭП-91
7	1100	22,5	Граница раздела ДМ-5-65 – ПЭП-91
8	1160	23,7	Граница раздела ДМ-5-65 – ПЭП-91
	<b>Р<sub>ср</sub> = 1225</b>	<b>σ<sub>ср</sub> = 25,0</b>	



Физическими методами установлено, что СВЧ обработка не изменяет структуру клея.

Механические испытания показали, что высокая прочность соединений адгезив – субстрат достигается как при традиционной технологии, так и при СВЧ – отверждении клея. В то же время

СВЧ обработка клея приводит к значительному снижению разброса значений прочности по сравнению с традиционной технологией. Характер разрыва аналогичен: по границе раздела ДМ-5-65 – ПЭП-91.

#### Литература

1. Подводные электроакустические преобразователи. (Расчет и проектирование) Справочник. / Под ред. В. В. Богородского. Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
2. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. 4-е изд. М.: Научный мир, 2007. - 576 с.
3. Тризно М.С., Москалев Е.В. Клеи и склеивание. Л.: Химия. - 120 с.
4. Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. Химия и физика полимеров. М.: Колос, 2007. - 367 с. .
5. Миронов В.С., Плещачевский Ю.М. Электрофизическая активация полимерных материалов. Гомель: ИММСНАНБ, 1999. - 172 с.
6. Синтез и модификация полимеров / под ред. Ю.Б. Монакова. М.: Химия, 2003. - 356 с.
7. Дехант И., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров / пер. с нем. под ред. Э.Ф. Олейника. – М.: Химия. 1976. – 472 с.
8. Смит А. Прикладная ИК спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение / пер. с англ. Под ред. А.А. Мальцева. – М.: Мир, 1982. - 328 с.
9. Ежовская Т, Бубликов А. ИК Фурье-спектрометры со специализированными приставками (НПВО, ИК-микроскоп и др.) // [www.j-analitics.ru](http://www.j-analitics.ru), 1/2012(2). С. 38-45.
10. ИК-Фурье спектрометр Spectrum 100 – Perkin Elmer / <http://optic.ucoz.ru/publ/4-1-0-40>.

#### References

1. Underwater electro-acoustic transducers (Calculation and design) Handbook /Edited by V.V. Bogorodsky, L. Sudostroyenie, 1983. – 248 pp.
2. A.A. Tager Physico-chemistry of polymers, 4<sup>th</sup> issue, M.: Nauchny mir, 2007 -576pp.
3. M.S. Trizno, E.V. Moskalev Adhesives and gluing. L.: Chimiya – 120 pp.
4. V.N. Kuleznev, V.A. Shershnev Polymer chemistry and physics. M.: Koloss, 2007, - 367 pp.
5. V.S. Mironov, Yu.M. Pleskachevsky Electro-physical activation of polymeric materials. Gornel: IMMSNANB, 1999 – 172 pp.
6. Polymer synthesis and modification / edited by Yu.B. Monakov. M.: Chimiya, 2003. – 356 pp.
7. I. Dechant, P. Danz, V. Kimmer, R. Schmolke Infrared spectroscopy of polymers / transl. from Germ. edited by E.F. Oleynik. – M.: “Chimiya”. 1976. – 472 pp.
8. A. Smith Applied IR spectroscopy: principles, technique, analytical application / transl. from Engl. edit. by A.A. Maltsev. – M.: Mir, 1982. – 328 pp.
9. T. Yezhevskaya, A. Bublikova IR Fourier-spectrometers with specialized attachments (NPVO, IR-microscope and oth.) // [www.j-analitics.ru](http://www.j-analitics.ru), 1/2012(2). С. 38-45.
10. IR-Fourier spectrometer Spectrum 100 – Perkin-Elmer/ <http://optic.ucoz.ru/publ/44-1-0-40>

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

УДК 658.3.07; ГРНТИ 73.01.75

**ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР-КАК РЕШИТЬ ПРОБЛЕМУ?****Marinov Марин Любенов**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем безопасности транспортных систем

Института проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук  
199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13  
тел. (812) 321-95-68 e-mail: marinlomsky@gmail.com**Скороходов Дмитрий Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем безопасности транспортных систем

Института проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук  
199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13  
тел. (812) 323-29-54 e-mail: skorohodovda@mail.ru**Турусов Сергей Николаевич**доктор технических наук, профессор, генеральный директор,  
Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения», 196105, Россия, Санкт-Петербург, улица Благодатная, дом 2,  
тел. +7(921) 752-65-44, e-mail: serniktur@yandex.ru**Аннотация**

В настоящее время не учитывается влияние самых мощных и устойчивых факторов поведения человека, не зависящих от его текущего состояния, конкретных условий и продолжительности работы, факторы: мораль, воля и интерес. Если охватить все аспекты понятия «человеческий фактор» то становится ясным, что только человеческое поведение, являющейся результатом принимаемых во всех жизненных ситуациях решений, отвечает их смыслу. Но есть проблема, оценка кадров и их решений сейчас проводится по критериям: образование, социальный статус, возраст, профессиональный опыт, профессионально важные качества, личностные и психофизиологические особенности (темперамент, характер, качества, способности, направленность личности). Эти критерий не отражают ни степень проявленного интереса, ни силы воли, ни нравственного содержания человека. Логика формирования человеческого поведения приводит к тому, что необходимо в корне изменить существующие представления о направленности, в котором нужно сосредоточить усилия в области образования, науки и профессиональной деятельности. Теперь эти усилия направлены в первую очередь на производство высококвалифицированных специалистов с хорошо развитыми качествами и способностями, но которые не понимают законов природы и грубы в отношении к ней и окружающим. Такой подход приводит только к временному и иллюзорному эффекту улучшения качества и безопасности деятельности человека. Желание оптимизировать вторичные факторы (профессиональные способности, качества, навыки) и игнорировать влияние ключевых факторов, влияющих на качество и безопасность (интерес-воля-мораль), это основная ошибка и причина очень низкой эффективности современных образовательных, научных и профессиональных подходов.

**Ключевые слова:** человеческий фактор, профессиональное поведение, ситуационное моделирование, безопасность, эффективность

**THE HUMAN FACTOR-HOW TO SOLVE THE PROBLEM?****M. Marinov**

PhD, leading researcher of the laboratory of vehicle safety systems

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences  
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13  
Tel. (812) 321-95-68 e-mail: marinlomsky@gmail.com

**D. Skorokhodov**

**Dr. Sci. Tech., the professor**, Chief researcher of the laboratory of vehicle safety systems  
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences  
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13  
Tel. (812) 321-95-68 e-mail skorohodovda@mail.ru

**S. Turusov**

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Director,  
Joint-stock company "Russian research design and technological Institute of electrical engineering", 2, Blagodatnaya  
street, Saint-Petersburg, 196105,  
phone: +7(921) 752-65-44, e-mail: serniktur@yandex.ru

**Abstract**

In the present time, the influence of the most powerful and stable factors of human behavior is not taken into the account, they are not dependent on the person's current state, specific conditions and duration of his work. Those factors are: moral, will and interest. The research findings represented in this article are changing still existing opinion that the only recruiting effort aimed people with qualities, abilities and high professional and psychological preparation, can lead to a noticeable increase in security and increase the efficiency of professional activity. Trying to optimize secondary factors and disregard for the influence of key behavioral factors (moral-will-interest), is a fundamental mistake and cause poor performance of today's educational approaches. The logic of formation of human behavior leads conclusions radically change the existing understanding of the direction in which the need to focus efforts in the field of education, science and professional activity. Now these efforts are focused primarily on the production of highly trained professionals with well-developed qualities and abilities, but do not understand the laws of nature and rude in respect to her and others. Such an approach leads only to a weak, temporary and illusory effect of improving the quality and safety of human activities carried out. Try to optimize the secondary factors (professional abilities, qualities, skills) and ignore the impact of key factors influencing the quality and safety of the (interest-will-morality), it is a fundamental mistake and cause a very low efficiency of today's educational, scientific and professional approaches.

**Key words:** human factor, professional behavior, situational modelling, security, effectiveness

**Introduction**

Now in the media and in science has become very widely used term "human factor". [9] Regardless of the widespread popularity of the word and in the media and in scientific circles about it do not give a precise definition, and it does not put any specific meaning. When speaking about the human factor, people usually want to point out that the person by their behavior affects the safety and the success of its operations, but how this happens, no one knows. [3] To investigate the influence of the human factor on the safety and success of ongoing activities there are different approaches [7], but most of them lead to the drawing up of a very bulky, complex, and often unrealistic sets of criteria for peer review. One thing is clear, has the leading role in all stages, and regardless of the fact that it is not the only source of errors and irregularities; it is man who is the one element in the chain, which in its decision combines in itself all the previous steps. As such, the person is the determining factor in a critical situation and the final authority in the course of their development to an emergency condition. Experience shows that people affected by both the state of technical objects (quality of design and manufacturing), and the reliability of their operation. Man estimates or determines all the

conditions of the activities. The level of additional security measures undertaken - forecasting the expected threats, environment monitoring, situation analysis and security activities also depend on it [8].

If you cover all aspects of the concept of "human factor", it becomes clear that only the human behavior, which is based on an infinitely repetitive process of decision-making, is in their meaning.

We are carrying out the study of human behavior [5] in areas such as the study of "collective psychology" and "safety culture"; drawing up "the matrix of the individual features"; diagnosis of cognitive abilities; Testing properties of human personality; study individual characteristics of temperament; Disclosure of human needs, and others. The most important feature of human behavior research results now is that almost never indicated to any factors which may be a permanent corrective to assess and predict human behavior in different situations. In order to reveal the effect of constant exposure to behavioral factors, you need to combine into a single model2 such diverse categories as instinct, perception, senses, mind, intellect, personality, spirituality, intuition, imagination, idea, thought, morality, will, interest and other. at that catches the eyes of these categories are characterized by a lack of research of its nature. Regardless of this, on the basis

of knowledge of their functionality (the role and appointment) and accessible information about their interaction and dynamics they can be combined into a single model.

The presented model of the dynamics of psychological processes indicates the following sequence: the perceived image of the sensitive organs of the observed object or phenomenon of the surrounding world is reflected in the human mind, giving rise to certain sensations, feelings and emotions, or causing some instincts (Figure 1.).

The same effect arises as a result of accidentally appeared in the mind of thoughts, feelings, associations, causing some initial interest in certain objects or phenomena that people have seen before. The mental image of (conscious mind) leads to ideas that can then occur under the guise of intuitive perception, or it can be concretized by the human mind, becoming a continuously evolving thought.

The mind, in accordance with the will of man, can "design" a thought in one of the following conventional areas: thought can cause a feeling of increased interest in the subject or phenomenon and the cause for the follow-up (Figure 1, I.); thought can cause a feeling of indifference (figure 1, II.); thought can influence the mind of another person, transmitting information, feelings, and act as a suggestion (Fig. 1, III) [7,8].

Depending on the degree of interest, willpower and moral level of human development can be observed dramatically different behavior that is in the range of manifestations of a sense of duty and a full commitment to a more or less superficial and even irresponsible attitude to perform their professional duties. [1]

In the case in connection with the arisen interest, the human will be sent to the commission of moral action, it is accompanied by a powerful stimulus pulse. Then will power is sufficient to mobilize the full mental and physical potential of a person to perform certain actions.

If conscious and responsible person, regardless of its qualities, from his psychophysiological state, the quality of training and the current problems, focuses on the correct analysis of the external and internal conditions. At the heart of its actions are the responsibility of taking care of people's lives, fail safe technology and conservation. In this case, a sense of duty and responsibility has a powerful mobilizing effect and serve as a constant stimulus, contributing to overcome the difficulties and limitations. This behavior ensures maximum safety and effectiveness of the labor process.

If the will of the person taking over the work aimed at the implementation of any selfish actions, based on the satisfaction of a personal nature needs (for example, - the desire to be realized, seem to prove their ability to get ahead of others, win, profit) - these actions will first be stimulated by a sense of interest. Interest in itself is a stimulant. But such stimulant as self-interest, not connected with the high moral sense of duty and responsibility, commitment, dedication, discipline, caring for people and nature. Interest in this kind aimed only at meeting the needs of the most per-

sonal and usually fades with their implementation is not. In this approach, people will not work "from the heart", "the idea", "for the benefit" of the company, staff, society, nature, and his actions over time will be ineffective and unsafe [4,6].

If the will is directed to meet the low or openly immoral desires or passions, begins the struggle of spiritual (moral) human nature with its "unhealthy" interest and the will to implement nested immoral ideas. This is the often observed and pronounced conflict between the higher and lower human nature (between conscience and desire), the outcome of which depends primarily on the strength of its morality and strength of his will and interest. If the human will for the implementation of a low desire is very strong, regardless of the resistance of conscience, it can bring an idea that appears to concrete actions. In this situation, human behavior can be cynically irresponsible, uncontrolled, dangerous and unpredictable consequences.

If interest and willpower are not enough, people will not finish until the end of the realization of their ideas or abandon it, and the idea is postponed in memory, like many other non-realized ideas.

Particular attention should be paid to the fact that the models referred to in the conditional behaviors are only tendencies. In different conditions, one and the same person can do more or less moral, with more or less imagination, and the will and the strength to experience a different interest. Just in the same situation, regardless of their moral convictions, a person can do quite extraordinary, justifying expectations. The reason for this unpredictability is variability of the external conditions and a variety of conditions in which a person falls. Therefore, information about human moral conviction, his force of will, the prevailing interests, professional and psychological training, qualities, abilities, motivations and needs, alone, cannot reveal long-term trends in its behavior. The impact of all the factors are always complex, and only their consideration in the unity and dynamic relationship may indicate a genuine human tendency [10].

The results of the situational simulations and observations indicate that there are three basic safety factor of human behavior, which reflect the level of spiritual and personal development, and largely determine the safety of its final decision. This is - the will, interest and morality (Figure 2.). Basic safety factors are fundamental to the security of all human behavior and are distinguished by the constancy and inertia. Therefore, rapid and effective action on them is practically impossible. Triad "morality - will - interest" is in unity, and the relationship, if there is no morality - will and interest lead to unsafe acts; if there is no will - the moral interests can not be realized; if there is no interest - the will to moral action can not make in your life. If a person is brought up to show the "will to moral and ethical actions, regardless of the nature of existing interests" it, in all situations, will direct their will to adopt highly responsible and healthy decisions. These factors are key determinants of further motivation of human behavior in all situations. And the factors that are now regarded as the leading (cognitive ability, physical quality, professional knowledge and skills and

psychophysiological training), may actually be the name of the minor (operational) factors.

Regardless of the classification of these factors it is evident that they should be considered only in the complex. Morale, commitment and interest are key factors to ensure that only the security of human behavior, but they are not sufficient for success. Only the harmonious development of man in a moral, volitional attitude and the formation of his interest, together with a professional, psychological and physical preparation, can be a good basis for the future success of its actions. To achieve high efficiency and safety of human actions, morality must be backed by comprehensive knowledge, experience, culture, faith must be deeply meaningful and should be transformed into wisdom, will be permanent and should lead to the persistence and the interest should be high and should lead to activity.

Human morality is a kind of frame in which can manifest free will and versatile and changeable human interests, so morale is a fundamental human behavior factor of safety. Moral (ethical, moral) development (from Latin *moralis* - Moral) - is the process by which since childhood a person is an active perception of the world, as well as an active reproduction of accepted moral norms and values. Many researchers reach the conclusion that the moral values of the different cultures of the world in its depth, almost the same. Different societies may hold different opinions as to what is bad and what is good, but they understand the same universal "natural" (fundamental) sense [7,8,10]. Per this sense, we can consider all moral values are now known to mankind, and to understand that they are common to assess the observed natural processes and to assess the human thoughts, feelings and actions. All are subject to the moral values of human ethical sense, there is natural, and at the same time, universal, principles such as the principle of unity; the principle of creation and destruction; harmony principle; principles of information; hierarchy; continuity; dynamic; free will; precautionary; permanence; regulation; economy. In this context, human immoral behavior is behavior that is contrary to the existing natural laws and moral - the fact that they correspond to.

Next, you need to solve another problem, namely, how it is possible, in the context of the above, assessed objectively, that the moral and what is not. Now every human activity is evaluated according to the criteria quantity, quality achieved results (manufactured products, services, activities) and the profit (loss) for the performer or producer. Such an evaluation of progress contains an assessment of embedded human will and reflects the interest shown by them, but in the common system, completely missing the most important aspect of the assessment of human activity - the moral and ethical aspect. This problem exists largely due to the fact that only a small number of well-known now, the moral qualities of man can be assessed objectively. Based on indicators related to moral character, it is very difficult, subjective and ultimately incorrect.

To solve the problem of moral evaluation the author proposes a new approach of combining existing

criteria is now a moral evaluation in three global moral criteria: nature balance criterion (which expresses the relationship of man to nature); the criterion of humanity (expressing the relation of man to other people) and the criteria manifestation of duty and responsibility (expressing the manpower moral conviction). This approach focuses on the moral evaluation of these three, the most important aspects of human existence, significantly reduces the number of indicators used and further simplifies the method of evaluation.

The only way to compensate for the inevitable subjectivity of moral evaluation (score one subject will inevitably put other entity), it is the comparison of expert assessments of public (collective) assessment. This fact implies the subordination of moral evaluation process to another (fourth) criterion - the criterion of "collective (public) control" (which expresses the attitude of society to the person).

The above concept involves diagnostic quality of professional activities not carried out as of now, only the following criteria: education, social status, age, professional experience, professional qualities, personality and physiological characteristics (temperament, character, qualities, abilities, personal orientation). This assessment provides an answer to the question of what a person can, but does not give an answer to the question how can this man be trusted. A full-fledged assessment of human activities should be carried out considering its axiological (value) characteristics, considering not only his professionalism, but also its "active life and professional position."

Based on the above concepts developed "Methodology axiological certification of professional activity of specialists and managers (irrespective of the professional sphere and practiced specialty) 'In accordance with which the inspection will be conducted by individual experts or by an expert group in the course of training and work on eight interrelated criteria: professionalism, attitude to people, relationship to nature, responsibility, will and interest, physiological qualities and abilities, collective (public) assessment.

While the evaluation criteria for professionalism, quality and physiological capacity reflects the extent to which human behavior is consistent with professional requirements. Based on criteria relevant to the people, for nature and responsibility, expresses the degree of confidence in the person and the evaluation criteria for the will and the interest expressed his attitude to the work performed. All professional and personal, moral and ethical qualities and abilities are considered because of the total and collective expert assessment.

This procedure provides that the experts and managers can take four kinds of certifications, giving them the opportunity to get a permit to work on every single phase: planning and organization of professional activities, work in a normal environment, the actions in an extreme situation, a certificate for successful completion of the year (full certification) and admission to the promotion:

Certification for the planning and organization of professional activities (AOPD) is advantageously carried out after the passage of the corresponding training cycle. Certification allows the employee (manager) for the certification work in a normal environment.

Certification on the stage of the work in a normal environment (ARNO) performed after AOPD and passing the appropriate cycle training on mastering duties to work in a normal environment. Certification entitles you to work in a normal environment and allows for certification of action in extreme conditions.

Attestation for admission to the activities in an emergency (ADEO) - can be carried out after the passage of AOPD, ARNO and passing the relevant training cycle in an extreme situation. Certification entitles you to action in an extreme environment and the passage of a full year of certification.

Full certification (PA) carried out at the end of the year to take stock of the results of training. Full certification as well, giving the right to promotion. In this context, it must take place, considering the requirements of the proposed new workplace and new responsibilities, and should identify potential employee to a new position.

For each type of certification, depending on the tasks, inspecting experts can select one of the following types of checks:

1. Test your knowledge and skills - includes checking specialized knowledge, knowledge of technical devices operated by means of knowledge of responsibilities for individual schedules, knowledge, guidance documents, knowledge of emergency life-saving equipment, standards of maintenance and operation, rules, etc. Held by examining, testing, verification of individual actions;

2. Test your skills - includes checking for action during simulator training, practical training or in actual operating conditions;

3. Comprehensive testing - including a complete check of knowledge, skills and professional skills (manager) in classroom, simulator and real exploitation conditions.

An exemplary sequence of certification foresees the following steps.

1. The preparatory work carried out before carrying out the certification, which is organized by the head of personnel service. He is developing criteria and indicators for assessment, prepare all the necessary forms certification of personnel activity, familiarize with the instruction evaluators, per the schedule for certification and is preparing the necessary materials of certified.

2. Organization of certification in the units engaged in their heads. If you need to test the heads of departments, the certification organization rests with the board.

3. Heads of organizations publish regulations for the certification. Some of these documents include

an order, a list of the evaluation commission, the plan for certification, the certification procedure, instructions for registration and storage of information, training program managers to conduct certification.

4. Human Resources prepares a form of certification personnel, the instructions and requirements for certification. All of this is prepared for each employee subject to certification.

5. In the main document of certification - employee appraisal form is entered all the necessary information for certification.

6. Leader or specialist conducting the certification must complete the sections of the form of certification, describes most of the work that has been done for Appraisee period.

7. Based on the description of the work done for the appraisal period working head evaluates the activity of the worker and holds a conversation with him.

8. Head and Certification Commission is considering materials on employee qualification.

9. The head is responsible for the observance of fairness in the application of performance indicators.

Thus, certification becomes a result of the commission's work, as well as the basis for deciding about the prospects of the transport worker. The final decision on the certification becomes a decision of the head of the commission with the participation of the head unit. Then, considering the assessments and recommendations, a decision on the further professional development of employees.

"Methods axiological certification of professional activity of specialists and managers", can be used for all the profession and specialty, in an easy to program and electronic form processing results. In this form, it is only one of the possible solutions to a problem with many mathematical processing of subjective data. The methodology reflects the most general principles and provisions, form the basis of the author's approach. Depending on the specifics of a professional, it allows for changes in the amount and content of the proposed indicators and may include additional modules for mathematical computations specified parameters.

### Conclusion

The above study the logic of formation of human behavior leads to the following conclusions:

- have a strong stable behavioral characteristic, which are not dependent on the torque of the human condition, the specific conditions and hours of work. In normal and extreme conditions of the priority factors that predetermine the logic of the formation of human behavior are moral, the will and interest.

- disclosed system factors and the associated system of criteria provides a real opportunity to get out of the maze assessment huge number of psychophysiological indicators related to sensory-perceptual, psychomotor, mnemonic, attentive, cognitive, imaginative properties of man, with the properties of the nervous system, cognitive style, and understand the general regularities of human behavior, regardless of conjuncture.

---

- conclusions radically change the existing understanding of the direction in which the need to focus efforts in the field of education, science and professional activity. Now these efforts are focused primarily on the production of highly trained professionals with well-developed qualities and abilities, but do not understand the laws of nature and rude in respect to her and others. Such an approach leads only to a weak, temporary and illusory effect of improving the quality and safety of human activities carried out. Try to optimize the secondary factors (professional abilities, qualities, skills) and ignore the impact of key factors influencing the quality and safety of the (interest-will-morality), it is a fundamental mistake and cause a very low efficiency of today's educational, scientific and professional approaches.

- to solve the problem with the change of human behavior for the better requires certain tools: intellectual, managerial, organizational, administrative, the least financial. But the necessary funds can be found only when the moral qualities are really demanded by society, and only when there the right understanding that any disharmonious human development invariably leads him on a vicious circle of inefficiency and insecurity.

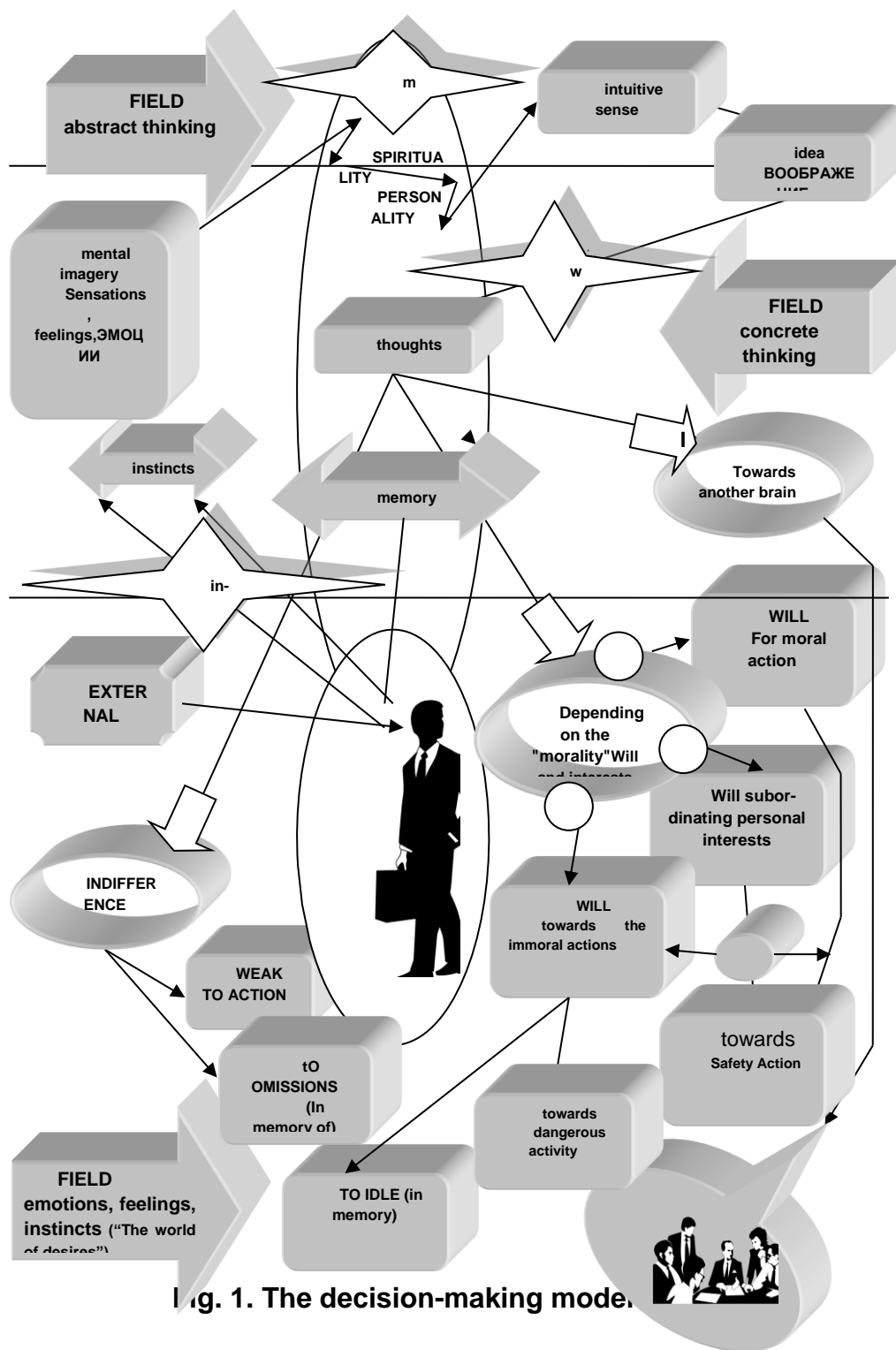


Fig. 1. The decision-making mode.

Литература

1. Скороходов Д. А., Маринов М. Л., Комашинский В. И. Метод диагностики профессиональной деятельности персонала транспортных систем с учетом его аксиометрических характеристик. // [Морские интеллектуальные технологии](#), № 1(35), т.1, 2017 г. С. 73-80;
2. Маринов М.Л. Малыгина Е. А., Роль человеческого фактора в проблеме транспортной безопасности // ж. „Проблемы управления рисками в техносфере” МЧС РФ, №2 (26), 2013 г. С. 19 – 26;
3. Маринов М.Л. Проблемы и перспективы оценки поведения руководителей и специалистов в профессиональной сфере // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2015. – №4(39). – с.215-224;



4. Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Функционально-психодинамический подход к оптимизации влияния человеческого фактора на безопасность транспортной деятельности // Транспорт: наука, техника, управление № 7, 2009 г. С. 18-22;
5. Маринов М. Л. Концепция подготовки специалистов по усвоению шельфа // Научный журнал „Морские интеллектуальные технологии” №1 (спецвыпуск), г. Санкт-Петербург, 2012 г. С. 85-88;
6. Маринов М.Л., Захаревич А.С., Катцын Д.В., Анализ влияния человеческого фактора на безопасность функционирования железнодорожного транспорта (на примере технологического цикла работы локомотивных бригад) // Научно- аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России № 3" С. 32 – 40;
7. Скороходов Д. А. Функции и режимы интегрированных систем управления // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ”, 2010. С. 84-91.
8. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Методика оценки эффективности комплексной безопасности транспортной компании // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы», выпуск №2 (2015).- с.24-29.
9. Хиггинс А., Кукки С. Проходимость спасательных судов на воздушной подушке. // Дизайн машины. – 2001. – №10. – С. 26-32.
10. 11. Sira Рамирес Н., Ибанез К.А. Контроль систем управления СВП // Динамика и управление – 2000. – №2. – С. 151-163.

#### References

1. Skorokhodov L.A., Marinov M.L., Komashinskiy V.I. Metod diagnostici professionalnoy deyatel'nosti personala transportnykh sistem s uchetom ego aksiometricheskikh harakteristik// Morskie intellektualnie tehnologii. – 2017. - №1(35), t.1. – s.73-80.
2. Marinov M.L., Malygina E. A. Rol' chelovecheskogo faktora v probleme transportnoy bezopasnosti // Problemy upravleniya riskami v tehnosfere. – 2013. – №2(26). – s.19 – 26.
3. Marinov M.L. Problemy i perspektivy ocenki povedeniya rukovoditelej i specialistov v professional'noj sfere // Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2015. – №4(39). – s.215-224.
4. Marinov M. L., Skorokhodov D.A., Functional-psihodinamicheskij approach to optimizing the impact of the human factor on the safety of transport // Transport: science, technology, Office No. 7, 200 9, pp. 18-22;
5. Marinov M. L. The concept of training in mastering shelf//scientific journal "Marine technology" No. 1 (special issue), St. Petersburg, 2012 g. s. 85-88;
6. Marinov M. L., Zakharevich A.S., Katcyn D.V., analysis of the impact of the human factor on security operation of railway transport (on the example of the technological cycle of locomotive crews) // Scientific-analytical journal "Vestnik St. Petersburg University of the State fire service of EMERCOM, no. 3, p. 32-40
7. Skorokhodov D.A. Funkcii i rezhimi integrirovannih sistem upravleniya // SPb.: Izd-vo SPbGETU „LETI”, 2010. P. 84-91.
8. Skorokhodov D.A., Starichenkov A.L. Metodika ocenki effektivnosti kompleksnoy besopasnosti transportnoy kompanii // Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sanrt-Peterburgsrijuj universiteta gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhbi», vipusk №2 (2015).- s.24-29.
9. Higgins A., Koucky S. Go-anywhere rescue hovercrafts. // Machine design. – 2001. – №10. – P. 26-32.
10. Sira-Ramirez H., Ibanez C.A. On the control of the hovercraft system // Dynamics and control. – 2000. – №2. – PP. 151-163.

УДК 656.07

## ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПО СИСТЕМНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЛИНЕЙНЫМИ КОНТЕЙНЕРНЫМИ ПЕРЕВОЗКАМИ

Кирилл Геннадьевич Тюленев  
заместитель председателя

Технический комитет по стандартизации «Водный транспорт»  
109074, г. Москва, Китайгородский проезд, дом 7, строение 1,  
e-mail: KirillTulenev@mail.ru

### Аннотация

Совершенствование инфраструктуры линейного судоходства является приоритетным направлением внешнеэкономической деятельности, реализации национального транзитного потенциала, увеличения объемов производства и повышения инвестиционного спроса. Глобальные тенденции взаимодействия международных транспортных процессов, способствующие снижению себестоимости мультимодальных контейнерных перевозок, значительно усиливают влияние ценовой конкуренции при стабильно высоком качестве предоставляемых продуктов. Актуальность исследования сферы линейного судоходства обусловлена значимостью совершенствования организационно-экономических механизмов управления линейными контейнерными перевозками во внешнеэкономической деятельности. Исследование процесса управления контейнерными перевозками позволяет сформировать концепции эффективной интеграции транспортных организаций. Показано, что дополнительный инфраструктурный резерв пропускной способности, создаваемый судоходной линией, стимулирует снижение транспортной составляющей стоимости продукции, рост конкурентоспособности локального производства, сопутствующее увеличение объемов внешней торговли и, соответственно, развитие системы мультимодальных перевозок региона, генерирующей прибыль организаций транспортного комплекса. Применение системного подхода в управлении линейными контейнерными перевозками способствует выполнению следующих целей, являющихся основой принятия решений оптимизации мультимодальных контейнерных перевозок: F1 – интеграции целей судоходной линии и наземной транспортной инфраструктуры на основе управления экономическими показателями и транспортно-технологическими параметрами ЛКС (линейного контейнерного сервиса); F2 – совершенствованию продукта интегрированной производственной деятельности ЛКС; F3 – внедрению интегрированных систем управления линейными контейнерными перевозками. Определены подцели и метод оперативного принятия управленческих решений.

**Ключевые слова:** транспортная инфраструктура, мультимодальные контейнерные перевозки, подцель, линейное судоходство, транспортный процесс, цель, эффективность.

## DECISION MAKING IN SYSTEM MANAGEMENT OF LINE CONTAINER SHIPMENTS

K. Tyulenev  
vice chairman,

Technical committee for standardization "Water transport"  
109074, Moscow, Kitaygorodsky proezd, 7, building 1,  
e-mail: KirillTulenev@mail.ru

### Abstract

Development of line shipping infrastructure is priority area of foreign economic activity positively affecting on national transit capacity, increasing production volumes and strengthening investment demand. Global trends in international transport processes, reducing cost of multimodal container shipments, significantly enhance influence of price-related competition subject to consistent high quality of transport products. The actual relevance of researching container shipping industry is determined by importance of improving organizational and economic mechanisms for line container transportations in international trade activities. Analysis of container management processes allows to form a concept of effective integration for companies of transport industry. The article represents additional infrastructure reserve of throughput capacity generated by container shipping lines, stimulates reduction of transportation component in production prime cost, competitiveness of local production, increase of foreign trade volumes and, accordingly, developing regional multimodal transportation system, generating GP of transport organizations. Application of systematic approach in management of line container shipments provides achievement of following objectives being basis of effective decision-making in multimodal transportations: F1 – integrating strate-

gic targets of container shipping lines and local transport infrastructure by regulating economic and technological parameters of line container services. F2 – improving integrated transport products; F3 – implementation of integrated systems for managing multimodal shipments. Defined subgoals and method of operational decision-making.

**Keyword:** transport infrastructure, multimodal container transportations, sub-goal, line container shipping, transport process, key objectives (goals), effectiveness.

**Введение**

Интеграция стратегических целей судоходной линии и наземной транспортной инфраструктуры в интересах регионального внешнеэкономического сотрудничества является одним из факторов эффективного развития национальной системы мультимодальных перевозок.

По состоянию на 1 февраля 2017 г. в линейном судоходстве использовалось 6.000 судов грузоподъемностью 255.480.383 тонн и общей вместимостью 20.650.250 TEU, включая 5.108 специализированных судов, предназначенных для перевозки грузов в ISO-контейнерах [7].

Исходя из планов введения в эксплуатацию нового тоннажа, продолжающийся избыточный рост приведет к достижению общей вместимости мирового флота контейнерных судов в 21,5 млн. ДФЭ (TEU) к окончанию четвертого квартала 2017 г. [5, 6].

Присутствующая тенденция роста флота судоходных линий обусловлена оптимизацией расходов при воздействии высококонкурентной среды.

Рассматривая рост емкости рынка на уровне 4,5% [2] относительно представленного увеличения объема вместимости контейнерного флота, мы можем прийти к следующему выводу: в ближайшие 2 года предложение мест на судах существенно превысит спрос на морские контейнерные перевозки.

Прогнозируемый дисбаланс будет вызывать резкие изменения уровня фрахтовых ставок. Сопутствующие действия судоходных линий по возвращению фрахта в зону доходности воплотятся в виде оперативного применения надбавок, корректирующих цену морской перевозки в большую сторону. Повышенная изменчивость уровня транспортных ставок дестабилизирует рынки и служит причиной дополнительного замедления мировой экономики.

В условиях высокой конкуренции и ограниченности спроса ведущие судоходные линии опре-

деляют стратегическую цель в виде оптимизации операционных расходов, что вызывает необходимость разработки соответствующего метода принятия рациональных решений. Именно снижение себестоимости контейнерной перевозки позволит двигаться к требуемым показателям прибыли и финансовой устойчивости в условиях умеренного роста рынка морских контейнерных перевозок.

**1. Стратегия глобального сокращения операционных расходов**

Практическая потребность в обработке растущего внешнеторгового грузопотока мотивирует локальных участников транспортного процесса инвестировать прибыль, привлекаемую благодаря целевой интеграции, в создание собственных инфраструктурных резервов пропускной способности, что является драйвером совершенствования регионального транспортного комплекса [3].

Приоритетные стратегические цели управления деятельностью судоходной линии включают достижение наивысших показателей эффективности производственной деятельности в условиях актуальной конъюнктуры международного рынка контейнерных перевозок, в соответствии с инвестиционными планами, действующей международной нормативно-правовой базой и процессами государственного регулирования сферы линейного судоходства.

Представленная стратегическая цель достигается путем создания инновационной транспортно-логистической инфраструктуры, позволяющей снизить операционные расходы, проводить более гибкую ценовую политику, опередить конкурентов в освоении грузопотоков [4]. В частности снижение себестоимости морской транспортировки груза становится возможно в ходе замены существующего тоннажа на контейнеровозы повышенной вместимости.

Согласно сегментации мирового контейнерного флота (рисунок 1) 86% линейных судов принадлежат к классам вместимостью до 10,000 TEU, 14% обладают вместимостью 10,000 TEU и более. При этом 51% проектов постройки нового тоннажа, размещенных в 2016 году, относились к категории более 10 000 TEU.

Контейнеровозы повышенной вместимости устанавливают новые стандарты энергетической эффективности и экологичности линейного судоходства.

Стоимость транспортировки груза в слоте судна вместимостью 22.000 TEU существенно ниже производственных показателей, действующих на сегодняшний день [2].

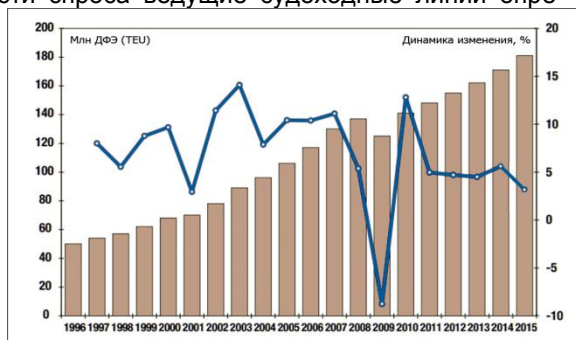


Рис.1 Объем международных контейнерных перевозок в период 1996-2015 г.

Годовые объемы расходов по эксплуатации судов вместимостью 12.500 TEU и 18.000 TEU находятся на сопоставимом уровне. При этом себестоимость транспортировки 1 TEU на контейнеровозе класса 18.000 TEU, с учетом его полной загрузки, существенно ниже относительно показателя судна вместимостью 12.500 TEU.

Ввод в эксплуатацию строящихся контейнеровозов приведет к демпингу базового уровня

фрахта. Значительно сокращая себестоимость транспортировки ДФЭ слота, мегаконтейнеровозы будут определять наиболее конкурентоспособный уровень фрахта в период ближайших лет. Параллельно с данным процессом важнейшей стратегической целью становится диверсификация судоходных сервисов, обеспечивающая эффективность эксплуатации контейнеровозов.

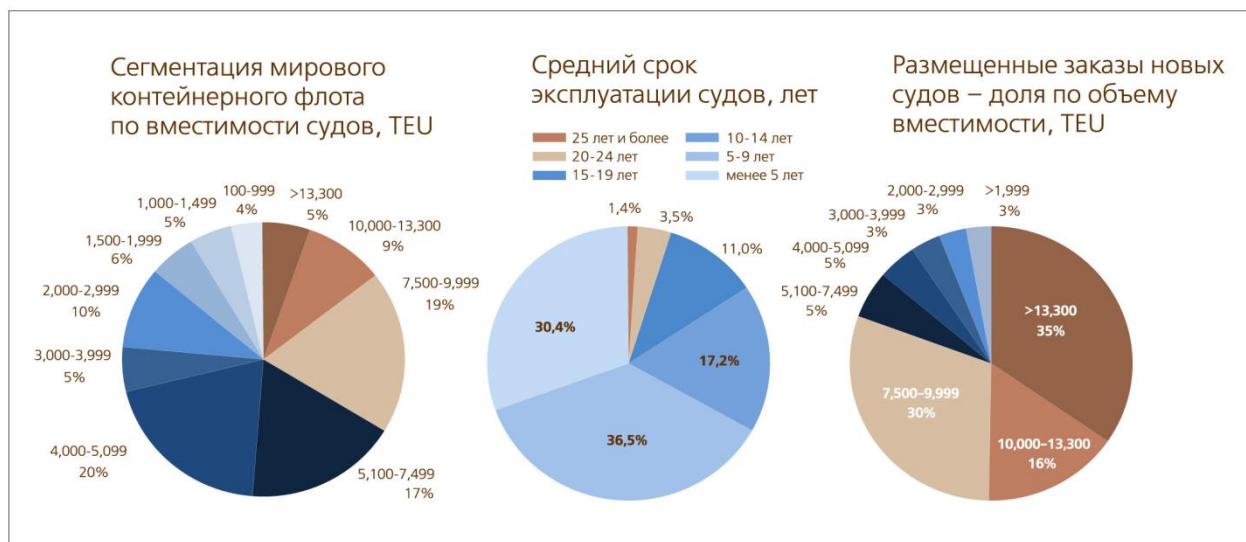


Рис. 2 Сегментация мирового контейнерного флота

**2. Необходимость оптимизации загрузки транспортной инфраструктуры**

Создавая потенциал гибкости ставок морского фрахта, эксплуатация крупнейших контейнеровозов в то же время определяет следующую цель глобальной системы управления контейнерным флотом – стабильность загрузки слотов в каждом судозаходе. В соответствии с изменением себестоимости транспортировки 1 ДФЭ относительно объема загрузки контейнеровоза, представленной на рисунках 3, 4, неполное использование мощностей приводит к росту уровня операционных расходов частного судозахода.

Стабильность загрузки судов будет достигаться за счет перевода до 80–85% клиентской базы на долгосрочные сервис-контракты с фиксированной еженедельной загрузкой слотов. В рамках данной тенденции средние грузопотоки будут консолидироваться в связи с привлекательностью коммерческих условий при стабильной загрузке слотов и возможностью эффективного перераспределения между диверсифицированными сервисами судоходных линий.

Потребность в централизованном управлении и консолидации грузопотоков определяет ключе-

вое значение грузовых контейнерных терминалов и транспортных операторов для стабилизации сферы морских контейнерных перевозок.

Качественное распределение глобальных грузопотоков для эффективной стабильной загрузки мощностей судоходных контейнерных линий позволит участникам транспортного процесса обрести ценовые преимущества по использованию морского фрахта.

В результате формирования производственной деятельности организаций транспортной инфраструктуры в направлении интеграции с представленными целями ведущих судоходных контейнерных линий приведет к достижению новых стратегических преимуществ и стабильному поступательному развитию сферы морских контейнерных перевозок.

Оптимизация производственной деятельности в направлении эффективности эксплуатации активов может быть воплощена в форме различных сценариев, зависящих от состояния спроса и предложения международного рынка контейнерных перевозок.

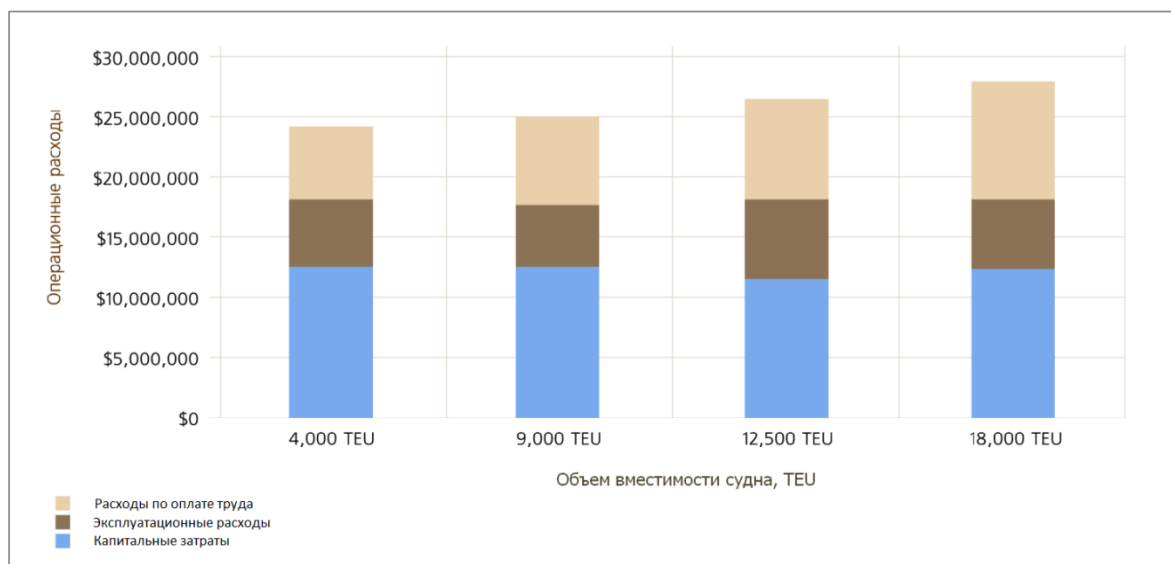


Рис. 3. Соотношение годовых расходов и вместимости судна

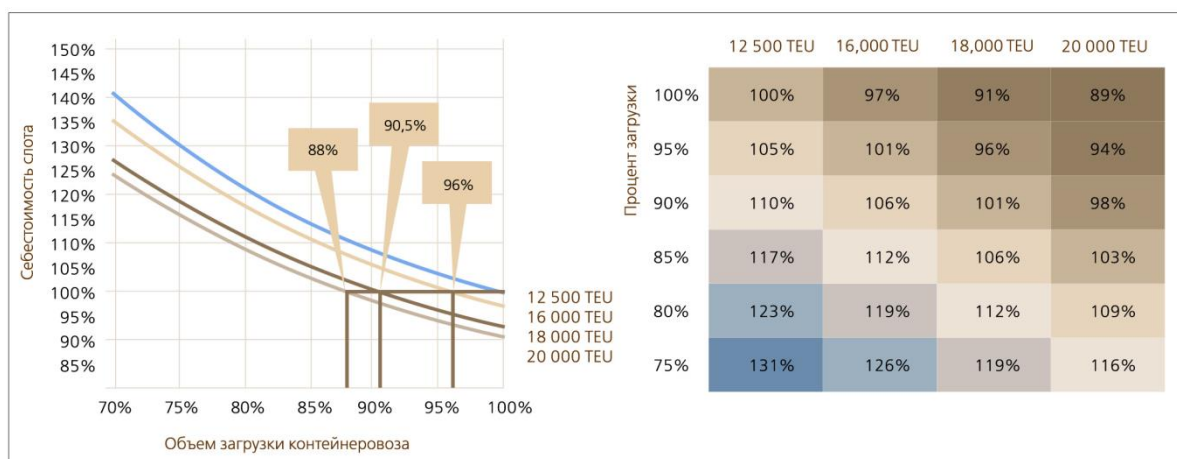


Рис. 4. Изменение себестоимости слота ДФЭ относительно объема загрузки контейнеровоза

Объем спроса сегментов международного рынка контейнерных перевозок оценивается с учетом потребности ведущих мировых производственных кластеров и потребительских рынков, прогнозируемых изменений потребления продукта контейнерной перевозки.

На основании анализа внешней среды судоходная линия вырабатывает политику достижения приоритетной стратегической цели путем решения двух взаимосвязанных задач.

Первая задача судоходной линии представляет собой определение оптимальной структуры и объема контейнерных слотов. Регулирование производственной мощности производится по итогам анализа состояния глобального спроса и предложения международного рынка.

Исходя из действующих тенденций, можно констатировать преобладающий рост потребности в освоении приоритетных регионов для

эксплуатации внедряемого или находящегося в процессе строительства контейнерного флота.

Второй задачей является дальнейшее распределение линейных слотов между приоритетными регионами международного рынка контейнерных перевозок, включая расширение деятельности или смену текущих регионов присутствия, выход в новые сегменты мирового рынка.

Таким образом, по итогам решения двух представленных задач спрос и предложение продукта контейнерной перевозки приходят в сбалансированное состояние, что обеспечивает оптимизацию линейной производственной деятельности.

### 3. Метод расчёта эффективности контейнерных перевозок для принятия рационального решения

Применение системного подхода к управлению инфраструктурой контейнерных перевозок способствует выполнению следующих

целей, являющихся основой принятия решений эффективной производственной деятельности по транспортировке контейнеров [8]:

F1 – интеграции целей судоходной линии и наземной транспортной инфраструктуры на основе управления экономическими показателями и транспортно-технологическими параметрами ЛКС (линейного контейнерного сервиса);

F2 – совершенствованию продукта интегрированной производственной деятельности с дальнейшей формализацией стратегических документов ЛКС;

F3 – внедрению интегрированных систем управления линейными контейнерными перевозками.

**Цель F1 включает в себя следующие подцели:**

F11 – проектирование структуры ЛКС, комплектование парка судов и контейнерного оборудования;

F12 – актуализация маршрутов и схем перевалки груза ЛКС;

F13 – номинация базовых портов судозахода;

F14 – выбор внутрипортовых терминалов;

F15 – разработка предварительного расписания движения судов;

F16 – акцептование базовых фидерных подсистем ЛКС;

F17 – совершенствование региональной организационной структуры судоходной линии;

F18 – рационализация применения транспортной инфраструктуры наземных контейнерных перевозок;

F11 – проектирование структуры ЛКС в свою очередь включает в себя следующие подцели:

F111 – детализированная оценка парка судов и оборудования с позиции объема контейнерных слотов, подлежащего эксплуатации на собственных и зафрахтованных судах; действующих договоров по использованию слотов сторонних судоходных линий; тоннажа, выводимого из эксплуатации с последующим списанием или продажей; слотов судов, планируемых к вводу в состав ЛКС;

F112 – оценка производственных возможностей и соответствия транспортно-технологических параметров наземной транспортной инфраструктуры, необходимой для эксплуатации ЛКС;

F113 – утверждение объема контейнерных слотов ЛКС для эксплуатации в рамках оптимизируемого или создаваемого ЛКС;

F114 – номинация регионов судозаходов ЛКС и укрупненное распределение контейнерных слотов по регионам;

F115 – прогнозирование объема грузопотока для взаимодействующих регионов и вариаций

портов судозахода на основании исследования рынка;

F116 – определение потребности ЛКС в контейнерном оборудовании и баланса его перемещения при функционировании ЛКС;

F117 – оценка среднегодового уровня прибыли ЛКС исходя из стоимости транспортных операций по данным статистики регионального рынка;

F118 – размещение заказов на постройку новых судов;

F119 – фрахтование судов;

F110 – совместное использование контейнерных слотов сторонних судоходных контейнерных линий.

F18 – рационализация применения транспортной инфраструктуры наземных контейнерных перевозок в свою очередь включает в себя следующие подцели.

С позиции контейнерных терминалов:

F181 – прием и обработку линейного оборудования в объеме, соответствующем предварительному прогнозу грузопотока ЛКС на рассматриваемом направлении;

F182 – оптимальность уровня ставки ПРР;

F183 – наличие свободного периода хранения оборудования;

F184 – применение принципов хранения оборудования исходя из минимизации общих терминальных расходов;

F185 – обеспечение возможности номерной выдачи оборудования;

F186 – готовность к выполнению сложного ремонта оборудования;

F187 – уторговывание стоимости наземной перевозки до внутрипортового терминала;

F188 – готовность к терминальной обработке специальных категорий грузов при организации линейной мультимодальной перевозки;

С позиции операторов наземной транспортировки:

F189 – определение приоритетных направлений наземной транспортировки путем анализа маршрутов системообразующих грузопотоков, выбор целесообразных ТТС при использовании локальной инфраструктуры автомобильного, железнодорожного и речного транспорта;

F1810 – рассмотрение ставок региональной перевозки и дополнительных востребованных сервисов (CFS), условий сверхнормативной эксплуатации транспортных средств, представленных со стороны подрядчиков;

F1811 – оценка надежности оператора наземной перевозки относительно достаточного объема активов, позволяющего осуществить покрытие

незапланированных расходов, наличия страхования ответственности, банковских гарантий;

F1812 – резервирование производственной мощности перевозчика в объеме, соответствующем потребности в транспортировке грузеного и порожнего оборудования ЛКС;

F1813 – реализация принципа использования одновременно нескольких альтернативных операторов наземной транспортировки.

**Цель F2 – совершенствование продукта интегрированной производственной деятельности с дальнейшей формализацией стратегических документов ЛКС включает в себя следующие подцели:**

F21 – проектирование транспортных продуктов ЛКС;

F22 – номинация приоритетных региональных грузопотоков;

F23 – планирование региональной коммерческой работы;

F24 – формализация линейных документов, устанавливающих экономические показатели и транспортно-технологические параметры ЛКС.

F25 – принятие бюджета ЛКС.

F21 – проектирование транспортных продуктов ЛКС в свою очередь производится исходя из:

F211 – выявления наиболее прибыльных и стабильных грузопотоков, формирующих потребность регионального рынка контейнерных перевозок;

F232 - сопоставления потребности участников рынка контейнерных перевозок и производственных возможностей ЛКС;

F233 - определения требуемого объема вовлечения контейнерных слотов ЛКС и внешней транспортной инфраструктуры для реализации актуальных ТТС линейной контейнерной перевозки;

F234 - утверждения базовых схем линейных контейнерных перевозок, акцептованных для реализации участникам потребительского рынка;

F235 - ранжирование продуктов ЛКС, применимых для реализации, по критерию прибыльности на единицу времени.

**Цель F3 – внедрение интегрированных систем управления линейными контейнерными перевозками, обеспечивающих оптимизацию экономических показателей производственной деятельности ЛКС путем регулирования транспортно-технологических параметров ЛКС и наземной транспортной инфраструктуры включает:**

F31 - систему проектирования конкурентоспособной ТТС линейной перевозки;

F32 - систему интеграции ТТС с совмещением линейных транспортных операций;

F33 - систему управления загрузкой контейнерных слотов ЛКС;

F34 - систему оптимизации баланса линейного контейнерного оборудования;

F35 – общую оценку валовой прибыли на единицу времени для основных ТТС;

F36 – оценку показателя валовой прибыли на единицу времени для альтернативных ТТС, применяемых в рамках интегрированной производственной деятельности.

Математическую зависимость уровня эффективности контейнерных перевозок в первом приближении можно представить в виде линейной комбинации указанных целей с соответствующими коэффициентами [8]:

$$Y = \sum_i k_i P_i,$$

где  $P_i$  – эффективность  $i$ -й цели, определяемая её численным значением,

$k_i$  – весовой коэффициент  $i$ -й цели.

При этом каждую цель, характеризующаяся множеством подцелей, можно определять аналогичной аддитивной формулой.

Эффективность каждой цели и подцели будем определять с помощью непрерывной функции желательности Харрингтона [8] или релейной функцией 0, 1. Функция Харрингтона позволяет установить связь между лингвистической шкалой оценки качества и значениями шкалы предпочтений  $d$ , указанными в таблице 1.

Таблица 1 Взаимосвязь между эмпирической и числовой системами.

Эмпирическая система (лингвистические значения)	Числовая система, $d$
Высокоэффективно	1,00÷0,81
Эффективно	0,80÷0,64
Среднеэффективно	0,63÷0,38
Малоэффективно	0,37÷0,21
Не эффективно	0,20÷0,00

Таким образом, эффективность цели будем рассчитывать, используя функцию Харрингтона, следующим образом:

$$P_i = \exp(-\exp(-Fi)),$$

где  $Fi=[-4÷4]$  – значения лингвистической шкалы, определяемые в соответствии с численным значением  $i$ -й цели. При этом:

$$Fi = \frac{8 * F_i^{mek}}{F_i^{onm}} - 4,$$

$$\text{при } F_i^{mek} \leq F_i^{onm}$$

$$F_i = \frac{8 * (2F_i^{onm} - F_i^{тек})}{F_i^{onm}} - 4,$$

при  $F_i^{тек} > F_i^{onm}$  ?

где  $F_i^{тек}$  - текущее (оцениваемое) численное значение  $i$ -й цели,

$F_i^{onm}$  - оптимальное (наилучшее), с точки зрения безопасности, численное значение  $i$ -й цели.

Вид данной функции представлен на рис.5.

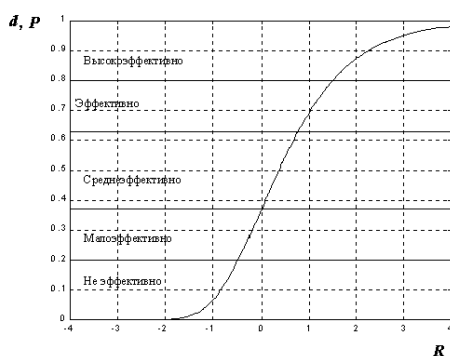


Рис.5 Непрерывная функция желательности Харрингтона

Поскольку указанные выше цели различны по степени их значимости для оценки уровня эффективности необходимо, прежде всего, определить коэффициенты важности (веса) каждой цели подцели. Для этого экспертам необходимо осуществить ранжирование всех целей и подцелей, подставив в элементы квадратной матрицы цифры 0, 1 или 2 в соответствии со следующим правилом:

если, по мнению эксперта, цель в строке важнее цели в столбце, то на пересечении строки и столбца ставится цифра 2, если цель менее важная, то ставится цифра 0, если равноценная, то – цифра 1.

Например, при наличии трёх целей: F1, F2, F3 исходная матрица выглядит следующим образом:

	F1	F2	F3
F1	1		
F2	*	1	
F3	*	*	1

Для сокращения времени заполнения матрицы соответствующие цифры вписываются только в пустые ячейки матрицы, т.е. эксперт заполняет только верхний диагональный треугольник. Ячейки, в которых находится символ «\*» заполняются зеркально-противоположно верхним, т.е. если на пересечении  $l$ -ой строки и  $j$ -го столбца стоит цифра 2, то на пересечении  $j$ -ой строки и  $l$ -го

столбца необходимо поставить цифру 0 и наоборот. Цифра 1 переносится зеркально без изменений.

После заполнения всех элементов матрицы определяются коэффициенты важности каждого фактора следующим образом:

1. Для квадратной матрицы факторов определяется сумма цифр, стоящих в каждой  $l$ -ой

строке, т.е. вычисляются значения  $\sum_{j=1}^m C_j$ , где

$j$  - столбец.

2. После этого складываются все цифры в столбце сумм строк, т.е. вычисляется значение

$$\sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^m C_{lj}.$$

3. Коэффициент важности по каждому фактору определяется как отношение суммы цифр в каждой строке к сумме цифр столбца

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^m C_j}{\sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^m C_{lj}}$$

Чем эффективнее выполнены наиболее весомые факторы, тем выше будет общий уровень качества, даже при невысоком проценте выполнения остальных факторов, и, наоборот, если менее важные факторы выполнены на 100%, но при этом невысок процент реализации наиболее весомых факторов, общий уровень безопасности будет невысокий.

### Заключение

Показано, что дополнительный инфраструктурный резерв пропускной способности, создаваемый судоходными контейнерными линиями, стимулирует снижение себестоимости транспортной составляющей внешнеэкономической деятельности, рост конкурентоспособности локального производства, сопутствующее увеличение объемов внешней торговли и, соответственно, объемов мультимодальных перевозок региона, генерирующих прибыль организаций транспортного комплекса. Применение системного подхода к управлению инфраструктурой контейнерных перевозок способствует выполнению следующих целей, являющихся основой принятия решений эффективной производственной деятельности по транспортировке контейнеров: F1 – интеграции целей судоходной линии и наземной транспортной инфраструктуры на основе управления экономическими показателями и транспортно-технологическими параметрами ЛКС; F2 – совершенствованию продукта интегрированной производственной деятельности ЛКС; F3 – внедрению интегрированных систем управления линейными контейнерными перевозками.

Определены подцели и метод оперативного принятия управленческих решений. Определены подцели каждой цели и метод оперативного принятия решения. При этом подцель F11



характеризуется в свою очередь 10 подцелями, а подцель F18 - 13 подцелями. Полученное после суммирования значение эффективности

$$Y = \sum_i k_i P_i$$

будет находиться в интервале от 0 (очень низкий уровень эффективности) до 1 (очень высокий уровень эффективности).

Значения  $Y \leq 0.37$  являются критическими уровнями эффективности. Для увеличения

общего уровня эффективности необходимо обратить внимание на те факторы, которые имеют большие коэффициенты веса и при этом низкую эффективность. Зная весовые коэффициенты, можно прогнозировать уровень эффективности интегрированной производственной деятельности судоходных контейнерных линий и наземной транспортной инфраструктуры.

#### Литература

1. Бауэрсокс Д., Клосс Д. Логистика. Интегрированная цепь поставок. – М.: Олимп-Бизнес, 2008. – 640 с.
2. Документы UNCTAD [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://unctad.org/en/Pages/Home.aspx>
3. Лимонов Э.Л. Внешнеторговые операции морского транспорта и мультимодальные перевозки. – СПб.: Информ. центр «Выбор», 2003. – 254 с.
4. Сток Д.Р., Ламберт Д.М. Стратегическое управление логистикой – М.: Инфра-М, 2005. – 828 с.
5. Международная база данных судоходства «Marine Traffic» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.marinetraffic.com/ru/ais/index/ships/range](http://www.marinetraffic.com/ru/ais/index/ships/range).
6. Международная база данных судоходства «Vessel Finder» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.vesselfinder.com/vessels](http://www.vesselfinder.com/vessels).
7. Международная база данных Alphaliner [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.alphaliner.com](http://www.alphaliner.com).
8. Скороходов Д.А. Системы управления движением кораблей с динамическими принципами поддержания. СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2000.

#### References

1. D.Bowersox, D.Closs, Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process – М.: Olimp-Business, 2008. – 640 p
2. UNCTAD [Электронный ресурс] – Режим доступа: [unctad.org/en/Pages/Home.aspx](http://unctad.org/en/Pages/Home.aspx)
3. Limonov E. L. foreign trade operations of Maritime transport and multimodal transport. – SPb.: Inform. center "Select", 2003. – 254 p.
4. Stoke D. R., Lambert D. M. Strategic logistics management – М.: Infra-M, 2005. – 828 p.
5. Database of ships "Marine Traffic", <http://www.marinetraffic.com/ru/ais/index/ships/range>.
6. Database of ships "Vessel Finder"; <http://www.vesselfinder.com/vessels>.
7. Alphaliner TOP 100 operated fleets; <http://www.alphaliner.com/top100>.
8. Skorokhodov D. A. the motion control System of ships with dynamic principles of support. SPb.: GNTS RF-TSNII "Elektropribor", 2000

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ,  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 656; 004.8, 004.942, 007.5, 51-7, 510.67

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОХОЖДЕНИЕМ СУДОВ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ СУДОПРОПУСКА  
ВОЛГО-ДОНСКОГО СУДОХОДНОГО КАНАЛА****Святослав Александрович Селиверстов**

кандидат технических наук, научный сотрудник

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13

Тел.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov\_s\_a@mail.ru

**Ярослав Александрович Селиверстов**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13

Тел.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

**Ольга Юрьевна Лукомская**

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13

Тел.: (812) 321-95-68, e-mail: luol@mail.ru

**Максим Анатольевич Асаул**

доктор экономических наук, доцент,

заместитель директора Департамента транспорта и инфраструктуры

Евразийская экономическая комиссия.

115114, г. Москва, ул. Летниковская, д. 2, стр. 1, стр. 2.

Тел.: (495) 669-25-17, e-mail: asaul@eecommission.org

**Аннотация**

Рассматриваются задачи управления движением судов по шлюзованным каналам на внутренних водных путях и процессом шлюзования в условиях увеличенного не структурированного транспортного потока. В качестве решения осуществляется разработка имитационной модели управления прохождением судов через систему судопропуска. Актуальность задачи подтверждается анализом перевалки грузов и грузооборотом внутреннего водного транспорта. Анализируются отечественные и зарубежные методы повышения эффективности прохождения судов по шлюзованным каналам и модели информационных систем управления судопропуска. Определяются исходные данные необходимые для создания модели. Осуществляется разработка алгоритмической части имитационной модели, в том числе определяется структура системы управления трассой судопропуска и описываются алгоритмы планирования, и регулирования процессом согласованного во времени движения судов по шлюзованным каналам. Определяются перспективы развития разработанной программной модели.

**Ключевые слова:** внутренний водный транспорт, имитационное моделирование, управление движением судов по шлюзованным каналам, алгоритмы планирования и регулирования, расписание.

**DEVELOPMENT OF THE SIMULATION MODEL OF MANAGEMENT OF THE  
LOCK CONTROL SYSTEM VOLGA-DON CHANEL****S.. Seliverstov**

Phd, Senior researcher,

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,

199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13

Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

**Y. Seliverstov**

Phd, Senior researcher,

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,  
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13

Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

**O. Lukomskaya**

Phd, Leading researcher,

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,  
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13

Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: luol@mail.ru

**M. Asaul**

D. Sc. Econ., Associate professor,

Deputy Director of Department of Transport and Infrastructure  
Euroasian Economic Commission.

115114, Moscow, Letnikovskaya Str., bld.1/2.

Tel.: (495) 669-25-17, E-mail: asaul@eeccommission.org

**Abstract**

The task of traffic control of courts of lock channels on internal waterways is considered and the locking process in conditions of an increased unstructured traffic flow. As a solution, the development of simulation management model for the passage of ships through the lock system. The urgency of the task is confirmed by the analysis of the transport of goods and the turnover of inland water transport of Total deep-water system. The domestic and foreign methods to improve the efficiency of ships passing process through the gated channels and models of information management systems of passage of ships on lock channels are analyzed. The initial data necessary for creating the model is determined. The algorithmic part of the simulation model is being developed, including the structure of the control system for the lock channels, and the planning algorithms are described, and the process of coordinated movement of ships along the gated channels is regulated. The development prospects of the developed simulation model are determined.

**Key words:** inland waterways, simulation, the management of the movement of ships through lock channels, planning and control algorithms, schedule.

**Введение**

Внутренний водный транспорт (ВВТ) является ключевым элементом, обеспечивающим сбалансированное и эффективное функционирование транспортной системы России. От качества работы транспортно-логистической системы, опирающейся на внутренне водные пути, зависит жизнеобеспечение регионов Крайнего Севера, в том числе Сибири и Дальнего Востока. По данным [1] рост объема перевозок грузов и пассажиров в регионах Крайнего Севера реализованный ВВТ в 2016 году составил 9% (18,5 млн.т.). В целом по России, согласно [2] перевозки грузов и грузооборот внутреннего водного транспорта увеличились на 2%. Те же тенденции отмечаются и на европейских внутренних водных путях [3], общий объем грузов перевозимых в 2014 году в Евросоюзе составил 551 млн.т, что на 3% больше, чем в предыдущем году. Описанные тенденции позволяют сделать вывод, что вопросы ускоренного развития внутренне водной транспортной инфраструктуры России приобретают особую экономическую и геополитическую значимость, что также отмечается в существующих государственных стратегических программах [4, 5].

Важной составной частью инфраструктуры Единой глубоководной системы Европейской части России является Волго-Донской судоходный канал (ВДСК) [6, 7, 8]. Согласно [9] в 2012 году наибольшее количество шлюзований было произведено через ВДСК – 100,3 тысяч шлюзований при этом прошлюзовано 116,3 тысяч единиц флота, увеличение количества шлюзований в сравнении с 2011 годом составило +12,3%. Таким образом, управление движением судов по шлюзованным каналам на внутренних водных путях и процессом шлюзования в условиях увеличенного не структурированного транспортного потока — сложная научная задача, от решения которой зависит конкурентоспособность внутренних водных путей и качество транспортного обслуживания на них.

Сегодня управление процессом прохождения судов по шлюзованным каналам, как правило, возлагается на судоводителя и диспетчерскую службу и увеличение объемов информации, поступающей на диспетчерский пункт, серьезно усложняет ее анализ и обработку в режиме реального времени. Результат ошибки диспетчера может привести к конфликтной ситуации [10,11], увеличенному времени простоя судов и крупным авариям и, соответ-

ственно экономическим и людским потерям. Существующие автоматизированные системы поддержки принятия решения системы не всегда обеспечивают надлежащее качество управления [12, 13]. Поэтому, существует необходимость в разработке программного комплекса позволяющего осуществлять процесс моделирования и автоматизированного управления движением судовых потоков по шлюзованным каналам с учетом планируемого расписания движения судов через трассу судопропуска. Данный программный комплекс позволил бы диспетчерам шлюзов обеспечить бесперебойный и бесконфликтный процесс управления с учетом времясберегающего фактора.

**1. Анализ предметной области**

Проблемам повышения качества функционирования прохождением судов по шлюзованным каналам посвящено множество российских и зарубежных работ [7, 8, 14-21].

В работе [14] повышение пропускной способности ВДСК предлагается достичь посредством возведения, специально оборудованного подходного канала к шлюзу №1 со стороны Волги, габариты которого должны соответствовать двухстороннему движению судов и отделяется от русла реки Волги незатапливаемой дамбой.

В [10] исследованы факторы, воздействующие на безопасность при пропуске судов через шлюзовые каналы, а также зависимость от этих факторов, графиков режимов движения судов и предложены все компоненты, необходимые для работы контрольно-информационной системы и поэтапный план действий по ее внедрению.

В [15] описано взаимодействие информационной системы шлюза с автоматической идентификационной системой шлюзуемых судов и принцип формирования расписания шлюзований в зависимости от интенсивности потока судов.

В работе [16] представлено сравнение методов глобальной оптимизации [17, 18] для работы экспертной системы, контролирующей процесс блокировки судна с целью поиска наиболее эффективно. Были сопоставлены оптимизация роевых частиц, оптимизация искусственной пчелиной колонии и генетический алгоритм [19, 20]. Результаты, представленные в [16], подтвердили, что все эти процедуры показывают сходные результаты и обеспечивают повышение эффективности работы шлюзовой системы, что говорит в пользу их применения при аналогичной оптимизации транспортных задач.

В [21] предложено решение проблемы управления движением судов по Кильскому каналу посредством разработки комбинаторного алгоритма динамической бесконтактной маршрутизации. Данное

решение было достигнуто интеграцией алгоритмических методов планирования движения поездов по однопутной сети [22, 23] и бесконтактной автоматизированной маршрутизации управления транспортными средствами [21].

В работе [24] предложена предсказательная модель гидродинамического взаимодействия судно-шлюз, позволяющая производить указания относительно маневрирования и контроля судов, проходящих через шлюз. В данной работе основное внимание уделяется гидродинамическим силам, действующим на судно, проходящим через шлюз. Нестационарные вязкие течения и гидродинамические силы вычисляются путем применения нестационарного уравнения Рейнольдса – Новье – Стокса с моделью турбулентности ренормализационной группы k-ε (RNG k-epsilon model). Предлагаемый метод проверяется для судна, проходящего через шлюз Пьер-Вандамме в Зебрюгге в модельном масштабе.

Проведенный анализ свидетельствует о высокой актуальности разработки специализированного программного обеспечения для расчета планируемого расписания движения судов через трассу Волго-Донского судопропуска и проработки математической модели и ее алгоритмического описания.

**2. Постановка задачи**

Целью работы является разработка алгоритмической части имитационной модели управления движением судов в шлюзовых системах судопропуска. Объектами управления являются суда, а параметром управления – время движения судов между шлюзами.

**3. Разработка алгоритмической части имитационной модели**

Исходными данными для разработки модели является схема трассы судопропуска ВДСК представлена на (Рис.1).

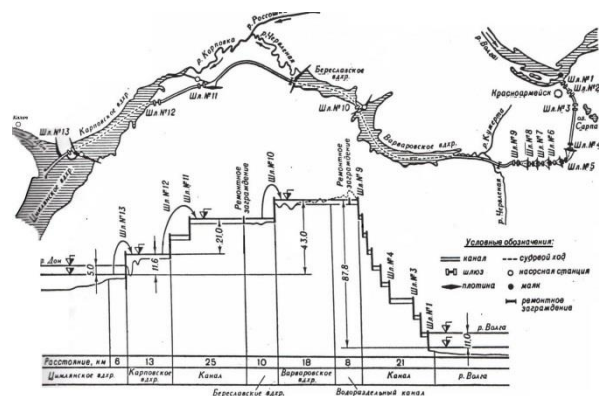


Рис. 1. Схематический план и продольный профиль Волго-Донского судоходного канала.

Трасса ВДСК характеризуется следующими параметрами (табл.1).

Таблица 1

Входные параметры

<i>i</i>	$T_{quant}$	$L_{ij}$	$V$	$T$	$V^{доп}$	$T_{ij}$	$t_r$
30		1,2	2,4	0:		0	0:
1		0	0	30	8,0	:09	21
1	0:30	1,4	2,8	0:		0	0:
		0	0	30	8,00	:11	19
2	0:30	1,7	3,4	0:		0	0:
		0	0	30	8,00	:13	17
3	0:30	8,0	8,0	1:		1	0:
		0	0	00	8,00	:00	00
4	0:30	2,1	4,2	0:		0	0:
		0	0	30	8,00	:16	14
5	0:30	2,8	5,6	0:		0	0:
		0	0	30	8,00	:21	09
6	0:30	1,5	3,0	0:		0	0:
		0	0	30	8,00	:12	18
7	0:30	1,2	2,4	0:		0	0:
		0	0	30	8,00	:09	21
8	0:30	1,2	2,4	0:		0	0:
		0	0	30	8,00	:09	21
9	0:30	8,0	8,0	1:		1	0:
		0	0	00	8,00	:00	00
9а		18,00	12,00	1:	12,00	1:30	0:
		00	00	30	0		00
10	0:30	12,00	12,00	1:	12,00	1:00	0:
		00	00	00	0		00
10б		15,00	7,50	2:		1	0:
		00	0	00	8,00	:53	07
11	0:30	5,8	5,8	1:		0	0:
		0	0	00	8,00	:44	16
12	0:30	15,00	10,00	1:	12,00	1:15	0:
		00	00	30	0		15
13	0:30	6,0	6,0	1:		0	0:
		0	0	00	8,00	:45	15

Где:  $L$  – общая длина трассы = 101 км.;  $n$  – количество шлюзов = 13;  $i$  – участок шлюза;  $L_{ij}$  – расстояние до следующего шлюза;  $T_{quant}$  – среднестатистическое время шлюзования судов –  $T_{quant} = T_0 = 30$  мин.;  $V$  – скорость движения на данном участке, км/ч;  $T$  – время движения, мин.;  $V^{доп}$  – допустимая скорость движения на  $i$ -том участке  $y(t)$ ;  $T_{ij}$  – время движения судна до следующего шлюза, мин.;  $t_r$  – резерв времени, мин.;

В диспетчерскую службу поступают заявки на прохождение трассы судопропуска. По ним составляется предварительное расписание движения судов, которое причислено к входным данным объ-

екта моделирования. Пример расписания входа судов в ВДСК приведен в (табл. 2).

Таблица 2

Время начала движения судов по ВДСК

№	Напр.	время		дата
		з	р	
В-Нефть-151	13	0:00	0:00	10.07.
т/х Шишкин	1	0:15	0:30	10.07.
В-Нефть-149	13	1:40	2:00	10.07.
Ст. Ногатино	1	3:15	3:30	10.07.
В-Нефть-251	13	3:30	3:30	10.07.
т/х Ражев	1	4:40	4:30	10.07.
В-Нефть-250	13	4:50	5:00	10.07.
В-Нефть-260	13	5:50	6:00	10.07.
Рудовоз-49	1	6:15	6:30	10.07.
Рудовоз-18	13	7:00	7:00	10.07.
Рудовоз-17	1	7:50	8:30	10.07.
В-Нефть-116	13	8:00	8:00	10.07.
т/х Волгарь, б	1	9:00	10:30	10.07.
Рудовоз-37	13	10:40	11:00	10.07.
т/х Меган, б	1	12:15	12:30	10.07.
В-Нефть-143	1	13:00	14:30	10.07.
В-Нефть-102	1	14:30	16:30	10.07.
БПМ-110, Бологое	13	14:40	15:00	10.07.
В-Нефть-252	1	15:40	17:30	10.07.
В-Дон-207	13	16:10	16:00	10.07.
Н.Рудовоз 36	1	16:45	19:30	10.07.
В-Нефть-265	13	16:50	17:00	10.07.

Пронский, б	13	17 :40	18 :00	10 .07.
РТ-460, б	1	18 :15	21 :30	10 .07.
БТМ-29, б	13	18 :45	20 :00	10 .07.
т/р Удмурт	1	18 :45	23 :30	10 .07.
т/р Удодов	13	20 :00	21 :00	10 .07.
Л-Нефть-136	13	21 :00	22 :00	10 .07.
Петрищево	1	19 :00	1: 00	11 .07.
В-Нефть-141	13	22 :00	1: 00	11 .07.
В-Нефть-137	13	22 :30	2: 00	11 .07.
В-Нефть-122	1	23 :30	2: 30	11 .07.
ст.Уссурийск	1	0: 30	3: 30	11 .07.
В-Нефть-150	13	1: 30	3: 00	11 .07.
В-Нефть-164	13	2: 30	6: 00	11 .07.
Н.Рудовоз 8	13	3: 30	8: 00	11 .07.
Омский-108	1	4: 30	7: 30	11 .07.
Н.Рудовоз 51	1	5: 30	8: 30	11 .07.
ст.Ленинград	1	6: 30	9: 30	11 .07.
тр. ТН-718	1	7: 30	10 :30	11 .07.
В-Нефть-104	1	8: 30	11 :30	11 .07.
т/х Тукай	1	9: 30	12 :30	11 .07.
т/хВолгарь-19, б	13	10 :30	14 :00	11 .07.
ОТА-931, б	13	11 :30	16 :00	11 .07.
В-Нефть-142	13	12 :30	17 :00	11 .07.
В-Нефть-230	13	13 :30	18 :00	11 .07.

Где: № – номер судна, Напр. – направление, з – заданное время, р – рабочее время.

В основе модели согласованного движения лежит кусочно-линейная временная аппроксимация функции  $y(t)$ , описывающей гладкую кривую трассы движения (рис. 2), шаг аппроксимации которой  $T_{\text{quant}}$ :

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i} = V_i^{\text{доп}}; \quad \frac{1}{T_{\text{quant}}} * \frac{(y_{i+1} - y_i)}{(k_{i+1} - k_i)} \leq V_i^{\text{доп}},$$

$$i = 1, n, \quad k_i \geq 1, k_{i+1} \geq 2,$$

$$t_{i+1} - t_i \geq T_{\text{quant}}; \quad t_{i+1} = k_{i+1} * T_{\text{quant}}; \quad t_i = k_i * T_{\text{quant}}$$

Где  $k_i$  – количество временных периодов, равных шагу аппроксимации на  $i$ -м участке:

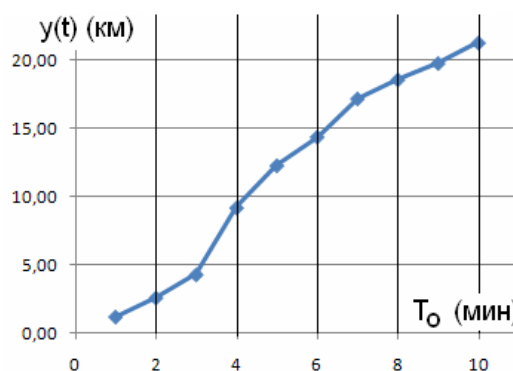


Рис. 2. Кусочно-линейная аппроксимация.

Разрабатываемая структура системы управления трассой судопропуска (Рис.3) включает процессы планирования, измерения и регулирования.

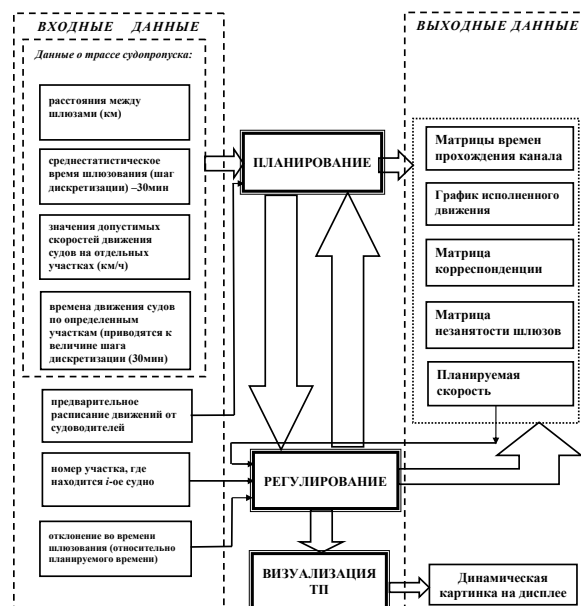


Рис. 3. Структура системы управления

В основе разрабатываемой системы управления лежат процессы планирования, измерения состояния объекта управления и регулирования.

Процесс планирования обеспечивается выполнением условий согласованности движения:

$$\forall i = \overline{1, n}; \forall p = \overline{1, k}; j = \overline{1, m}$$

$$\left| T_{ij}^{\text{вх}} \uparrow - T_{pj}^{\text{вых}} \downarrow - \left| T_{ij}^{\text{вых}} \uparrow - T_{pj}^{\text{вх}} \downarrow \right| \right| = 2T_{\text{quant}}$$

и непрерывности:

$$\forall i = \overline{1, n}; \forall p = \overline{1, k}; j = \overline{1, m}$$

$$\left( T_{ij}^{\text{вх}} \uparrow + T_{pj}^{\text{вых}} \downarrow \right) - \left( T_i^{\text{вх}} \uparrow + T_p^{\text{вх}} \downarrow \right) = T_{\text{пл}}, \text{ при } V_j \leq V_j^{\text{доп}}$$

Где  $2T_{\text{quant}}$  – период шлюзования 2-х судов;  $T_{\text{пл}}$  – плановое время прохождения канала;  $T_{ij}^{\text{вх}}, T_{ij}^{\text{вых}}$  ( $T_{pj}^{\text{вх}}, T_{pj}^{\text{вых}}$ ) период – соответственно времена прихода  $i$ -того (или  $p$ -того) судна в  $j$ -тый шлюз и выхода из него,  $T_i^{\text{вх}}, T_p^{\text{вх}}$  ( $T_i^{\text{вых}}, T_p^{\text{вых}}$ ) времена входа (выхода) судов в систему с противоположных концов.

Процесс измерения состоит в поиске временных отклонений реальных значений времён шлюзования судов  $\Delta T_{\text{шл}}$  от запланированных  $T_{\text{пл}}$ , что влечет соответствующие изменения в плановых значениях времён  $\Delta T_{ij}$  движения  $i$ -го судна на  $j$ -ом участке системы судопропуска, и следовательно нарушению параллельности временных графиков движения судов.

Процесс регулирования состоит из двух этапов. На первом этапе производится последовательное сравнение времен прохождения судов через канал. Отклонение на каждом участке движения сравнивается с максимально допустимым значением, которое высчитывается согласно

$$\Delta T_{ij}^{\text{max}} = \left( L_{ij} / V_{ij}^{\text{пл}} - L_{ij} / V_{ij}^{\text{max}} \right) * 60$$

Где  $V_{ij}^{\text{max}}$  – максимально допустимая скорость движения на данном участке;  $V_{ij}^{\text{пл}}$  – планируемая скорость движения.

Если отклонение не превышает максимально допустимое  $\Delta T_{ij} \leq \Delta T_{ij}^{\text{max}}$ , то оно полностью устраняется к следующему шлюзу. В противном случае часть отклонения переносится на следующий шлюз  $\Delta T_{ij+1} = \Delta T_{ij} - \Delta T_{ij}^{\text{max}}$ .

На втором этапе регулирования осуществляется разрешение конфликтных ситуаций, согласно [8].

Обобщенная последовательность действий разрабатываемого вычислительного комплекса моделирования выполняется согласно рис. 4.

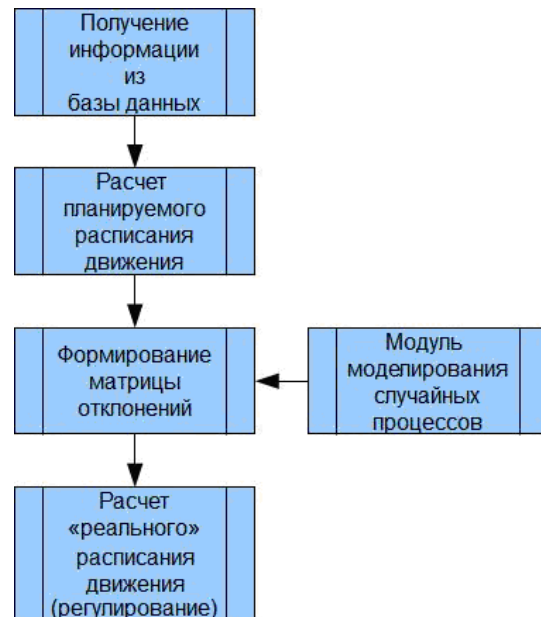


Рис. 4. Обобщенная последовательность действий моделирования

Алгоритмическая часть имитационной модели реализована с использованием фреймворка Qt Creator и активно использует объектно-ориентированную и обобщенную парадигмы программирования языка высокого уровня C++.

#### 4. Описание алгоритмов планирования

##### 4.1. Алгоритмы планирования

Таблица планируемых времен прохождения судов через трассу судопропуска строиться с использованием общего алгоритма расчета планируемого расписания. Таблица представляет из себя QList, каждый элемент которого представляет собой набор QMap, хранящий в себе информацию о прохождении конкретного судна через трассу судопропуска. Каждый такой набор содержит список из наборов, в каждом из которых записывается время прибытия в узел – entryTime и время отбытия из узла – outTime, а также информацию о курсе судна.

Исходными данными для алгоритмов планирования является информация о трассе судопропуска и заявочный лист [8, 25]. Общий алгоритм расчета планируемого расписания представлен на (рис.5).

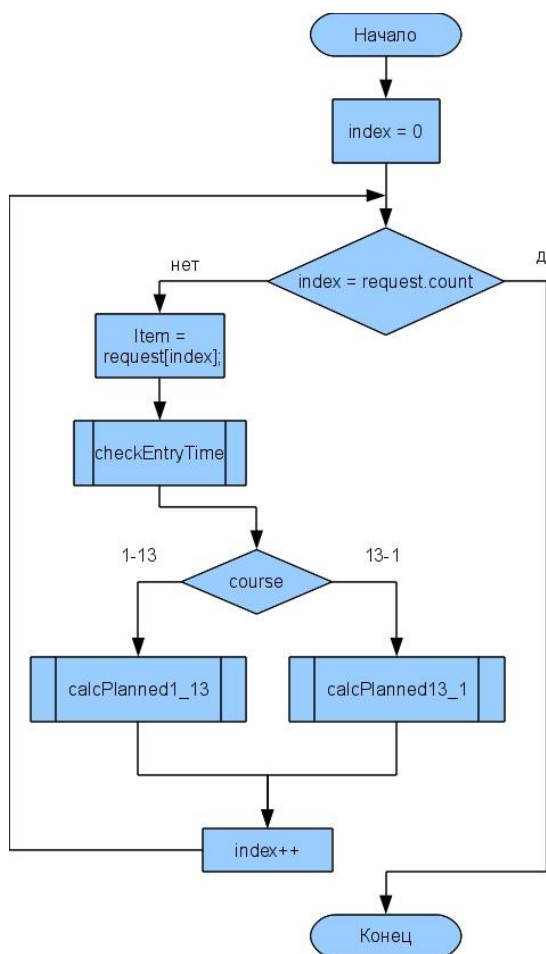


Рис. 5. Общий алгоритм расчета планируемого расписания

Где Request – массив заявок; Index – номер текущего элемента массива заявок; Item – текущий элемент; CalcPlanned1\_13 – функция для расчета планируемого расписания движения для отдельного элемента массива заявок, следующего курсом 1-13; CalcPlanned13\_1 – функция для расчета планируемого расписания движения для отдельного элемента массива заявок, следующего курсом 13-1; CheckEntryTime – функция, которая получает в качестве входных данных ссылку на переменную, содержащую планируемое время входа и сравнивает его с временами входа ранее рассчитанных элементов расписания планируемого движения; «result» – массив, который содержит значения времен прохождения судна по каналу; Gateway – массив объектов, каждый из которых содержит информацию о конкретном шлюзе; CheckConflict – функция, которая проверяет на наличие конфликтных ситуаций (рис.6).

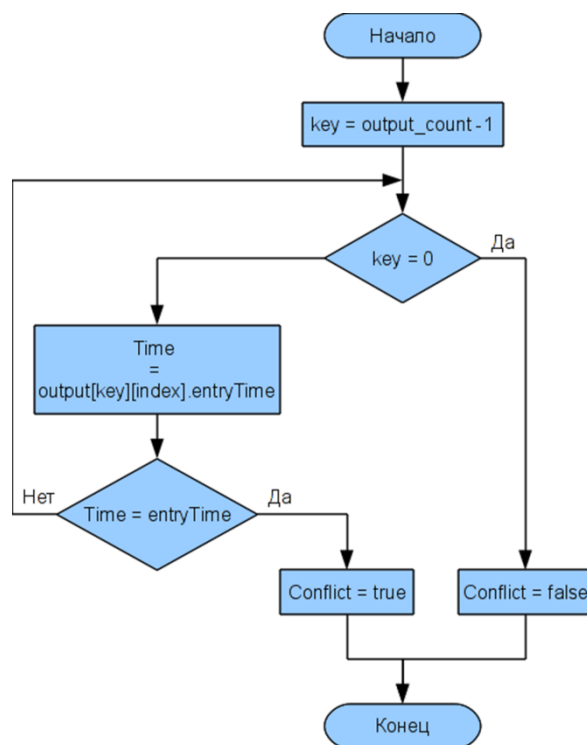


Рис. 6. Функция checkConflict

#### 4.2. Алгоритмы регулирования

Исходными данными для алгоритмов регулирования является таблица планируемых времен прохождения судов через трассу судопропуска и матрица отклонений от принятого времени шлюзования.

Первый этап регулирования представлен на (рис. 7), а второй на (рис. 8).

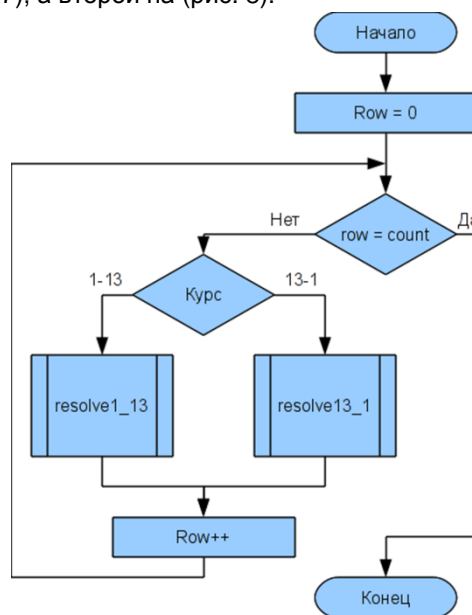


Рис. 7. Первый этап регулирования

Где: Row – индекс текущего рассматриваемого элемента из таблицы времен прохождения; Resolve1\_13 – функция, которая последовательно



проходит по одному элементу из расписания, который следует курсом 1-13, и на каждом этапе выполняет коррекцию времен прохождения через участки трассы; Resolve13\_1 – функция аналогична функции resolve1-13, но обрабатывающая суда, двигающиеся по направлению 13-1.

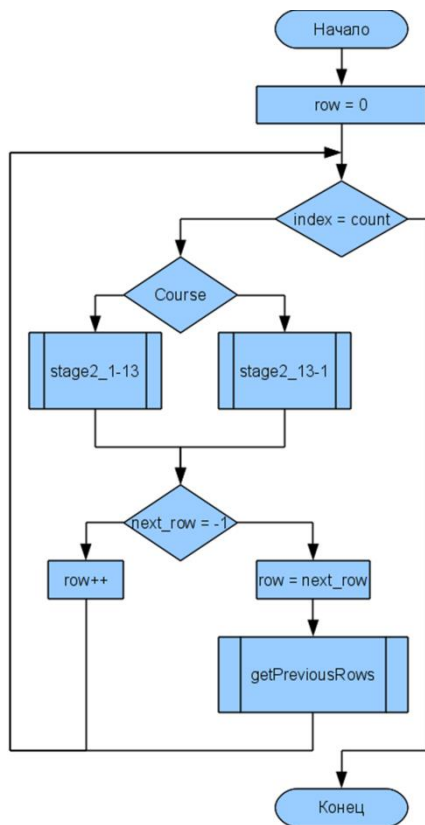


Рис. 8. Второй этап регулирования

Где Stage2\_1\_13 – функция, которая последовательно проходит по одному элементу из расписания, который следует курсом 1-13, и на каждом этапе выполняет поиск и разрешение конфликтных ситуаций; Stage2\_13\_1 – аналогичная Stage2\_1\_13 для курса 13-1; GetPreviousRows – функция, которая ищет ближайшие предыдущие элементы разных курсов для текущего элемента.

### 5. Выводы

Разработанная модель решает диспетчерские задачи [26] организации согласованного во времени пространственного движения встречных транспортных потоков [8, 25], обеспечивает повышение реальной пропускной способности системы обслуживания грузопотоков посредством автоматического расчёта, оперативной корректировки временных графиков движения транспортных средств.

Модель обеспечивает информационную поддержку транспортных процессов и может быть ис-

пользована при построении компьютерных систем автоматизированного управления работой транспортных компаний, служит основой построения тренажёров соответствующей ориентации.

### 6. Дальнейшие перспективы

Совершенствование программной модели предполагается осуществлять по следующим направлениям:

1. детализация системы учета приоритетов в движении судов на этапе планирования и регулирования транспортного процесса [27];
2. моделирование и оптимизация работы шлюзовых механизмов и сигнальных устройств на микропроцессорной основе;
3. совершенствование программного интерфейса (API) для написания внешних модулей и написание привязок к языку программирования Javascript, что позволит в дальнейшем писать на нём новые модули;
4. использование модуля QtDeclarative для создания более динамичного пользовательского интерфейса.

## Литература

1. Соколов М.Ю. Текст доклада Министра транспорта Российской Федерации Развитие внутренних водных путей Российской Федерации, как долгосрочный и комплексный проект. [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/itc/Mr.\\_Maksim\\_Sokolov\\_\\_Minister\\_of\\_Transport\\_of\\_the\\_Russian\\_Federation.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/itc/Mr._Maksim_Sokolov__Minister_of_Transport_of_the_Russian_Federation.pdf)
2. Транспорт и связь в России. 2016: Стат.сб./Росстат. - Т65. М., 2016. - 112 с.
3. [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main\\_Page](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main_Page)
4. Стратегии развития внутреннего водного транспорта до 2030 года (утв. распоряжением Правительства от 22 ноября 2008 года №1734-р.).
5. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. N 1734-р).
6. Аксенова Н.А. Роль и значение волго-донского судоходного канала в развитии пригородных зон волгоградской области // В сборнике: Проблемы и перспективы развития современных пригородных зон Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Министерство образования и науки Российской Федерации ; Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. 2015. С. 150-153.
7. Белый О.В., Кокаев О.Г., Теребнев Л.В. Инновационное развитие внутренних водных путей. Транспорт Российской Федерации. 2009. № 3-4 (22). С. 54-57.
8. Лукомская А.Ю., Трифанов В.Н. Об управлении движением транспортных потоков. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Автоматизация и управление. №5.– 2009. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. С. 39–44.
9. Об основных итогах деятельности морского и внутреннего водного транспорта в 2012 году, задачах на 2013 год и среднесрочную перспективу до 2015 года. Информационно-аналитические материалы к расширенному заседанию Совета Федерального агентства морского и речного транспорта 01 марта 2013. Министерство транспорта Российской Федерации Федеральное агентство морского и речного транспорта. [www.lgbu.ru/doc/04.03.2013/Result\\_2012.docx](http://www.lgbu.ru/doc/04.03.2013/Result_2012.docx)
10. Каюда А.В, Колосов М.А. Разработка контрольно-информационной системы обеспечения безопасности судопропуска // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 2. С. 337-345.
11. Wang H.Z., Zou Z.J. Behaviours of a Ship Passing through a Lock under the Influence of a Berthed Ship. International Workshop on Next Generation Nautical Traffic Models 2013, Delft, The Netherlands. P. 62-70.
12. Правила пропуска судов через шлюзы внутренних водных путей. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации (Минтранс России) от 3 марта 2014 г. N 58 г. Москва.
13. Тарасов. В.В. Обеспечение технологической безопасности судопропуска на Волго-Донском судоходном канале (информационно-управляющая система). ГИДРОТЕХНИКА XXI ВЕК №1 (4) 2011. С.24-27
14. А.А. Сазонов, Е.В. Землянова. Один из путей повышения пропускной способности Волго-Донского судоходного канала // Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки-2012». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 1. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012.–328с.
15. Белоусов И.В. Формирование оптимального расписания движения судов через шлюз по критерию минимума времени простоя // Региональная информатика и информационная безопасность Сборник трудов. Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления. 2015. С. 508-511.
16. Ž. Kanović, V. Bugarski, T. Bačkalić: Ship Lock Control System Optimization using GA, PSO and ABC: A Comparative Review // Promet – Traffic&Transportation, Vol. 26, 2014, No. 1, 23-31
17. Collette, Y., Siarry, P.: Multiobjective optimization: principles and case studies. Berlin: Springer; 2004.
18. Rao, R.V., Patel, V.: Multi-objective optimization of two stage thermoelectric cooler using a modified teaching-learning-based optimization algorithm. Engineering Applications of Artificial Intelligence.2013; 26(1):430-445. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2012.02.016>
19. Michalewicz, Z.: Genetic algorithms + data structures = evolution programming. 3rd ed. Berlin: Springer Verlag; 1999.
20. Jantzen, J.: Foundations of fuzzy control. New Jersey: John Wiley and Sons; 2007.
21. E. Gawrilow, E. Köhler, R.H. Möhring, and B. Stenzel. Dynamic routing of automated guided vehicles in real-time. In H.-J. Krebs and W. Jäger, editors, Mathematics: Key Technology for the Future, pages 165–177. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
22. R.M. Lusby, J. Larsen, M. Ehrgott, and D. Ryan. Railway track allocation: models and methods. OR Spectrum, 33(4):843–883, 2011.
23. M. Skutella. An introduction to network flows over time. In W. Cook, L. Lovász, and J. Vygen, editors, Research Trends in Combinatorial Optimization, pages 451–482. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
24. Wang Hong-zhi, Zou Zao-jian. Numerical Prediction of Hydrodynamic Forces on A Ship Passing. Through A Lock. China Ocean Eng., Vol. 28, No. 3, pp. 421 – 432. DOI 10.1007/s13344-014-0034-3, ISSN 0890-5487
25. Кокаев О.Г. Интеграция водной транспортной структуры России в Европейскую транспортную систему: проблемы и решения. Транспорт Российской Федерации. 2007. № 9 (2). С. 36-41.
26. Трифанов В.Н. Инвариантный анализ и управление в транспортных системах. СПб.: Элмор, 2003.
27. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 2 (30). С. 69-80.

## References

1. Sokolov M.YU. Tekst doklada Ministra transporta Rossijskoj Federacii Razvitie vnut-rennih vodnyh putej Rossijskoj Federacii, kak dolgosrochnyj i kompleksnyj proekt. [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/itc/Mr.\\_Maksim\\_Sokolov\\_\\_Minister\\_of\\_Transport\\_of\\_the\\_Russian\\_Federation.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/itc/Mr._Maksim_Sokolov__Minister_of_Transport_of_the_Russian_Federation.pdf)
2. Transport i svyaz' v Rossii. 2016: Stat.sb./Rosstat. - T65. M., 2016. - 112 s.
3. [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main\\_Page](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main_Page)
4. Strategii razvitiya vnutrennego vodnogo transporta do 2030 goda (utv. rasporyazheniem Pravitel'stva ot 22 noyabrya 2008 goda №1734-r.).
5. Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda (utv. rasporyazheni-em Pravitel'stva RF ot 22 noyabrya 2008 g. N 1734-r).
6. Aksenova N.A. Rol' i znachenie volgo-donskogo sudohodnogo kanala v razvitii prigorodnyh zon volgogradskoj oblasti // V sbornike: Problemy i perspektivy razvitiya sovremennyh prigorodnyh zon Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii ; Volgogradskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. 2015. S. 150-153.
7. Belyj O.V., Kokaev O.G., Terebnev L.V. Innovacionnoe razvitie vnutrennih vodnyh putej. Transport Rossijskoj Federacii. 2009. № 3-4 (22). S. 54-57.
8. Lukomskaya O.YU., Trifanov V.N. Ob upravlenii dvizheniem transportnyh potokov. Izves-tiya SPbGEHTU «LEHTI». Avtomatizaciya i upravlenie. №5.– 2009. – SPb.: SPbGEHTU «LEHTI». 2009. S. 39–44.
9. Ob osnovnyh itogah deyatelnosti morskogo i vnutrennego vodnogo transporta v 2012 godu, zadachah na 2013 god i srednesrochnuyu perspektivu do 2015 goda. Informacionno-analiticheskie materialy k rasshirennomu zasedaniyu Soveta Federal'nogo agentstva morskogo i rechnogo transporta 01 marta 2013. Ministerstvo transporta Rossijskoj fe-deracii Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transporta. [www.lgbu.ru/doc/04.03.2013/Result\\_2012.docx](http://www.lgbu.ru/doc/04.03.2013/Result_2012.docx)
10. Kayuda A.V., Kolosov M.A. Razrabotka kontrol'no-informacionnoj sistemy obespecheniya bezopasnosti sudo-propuska // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2017. T. 9. № 2. S. 337-345.
11. Wang H.Z., Zou Z.J. Behaviours of a Ship Passing through a Lock under the Influence of a Berthed Ship. International Workshop on Next Generation Nautical Traffic Models 2013, Delft, The Netherlands. P. 62-70.
12. Pravila propuska sudov cherez shlyuzy vnutrennih vodnyh putej. Prikaz Ministerstva transporta Rossijskoj Federacii (Mintrans Rossii) ot 3 marta 2014 g. N 58 g. Moskva.
13. Tarasov. V.V. Obespechenie tekhnologicheskoy bezopasnosti sudopropuska na Volgo-Donskom sudohodnom kanale (informacionno-upravlyayushchaya sistema). GIDROTEKHNIKA XXI VEK №1 (4) 2011. S.24-27
14. A.A. Sazonov, E.V. Zemlyanova. Odin iz putej povysheniya propusknogo sposobnosti Volgo-Donskogo sudohodnogo kanala // Trudy 14-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo fo-ruma «Velikie reki-2012». Materialy nauchno-metodicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, specialistov i studentov «Problemy ispol'-zovaniya i innovacionnogo razvitiya vnutrennih vodnyh putej v bassejnah velikih rek». Tom 1. – N. Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT», 2012.–328s.
15. Belousov I.V. Formirovanie optimal'nogo raspisaniya dvizheniya sudov cherez shlyuz po kriteriyu minimuma vremeni prostoya // Regional'naya informatika i informacionnaya bezopasnost' Sbornik trudov. Sankt-Peterburgskoe Obschestvo informatiki, vychislitel'noj tekhniki, sistem svyazi i upravleniya. 2015. S. 508-511.
16. Ž. Kanović, V. Bugarski, T. Bačkalić: Ship Lock Control System Optimization using GA, PSO and ABC: A Comparative Review // *Promet – Traffic&Transportation*, Vol. 26, 2014, No. 1, 23-31
17. Collette, Y., Siarry, P.: *Multiobjective optimization: principles and case studies*. Berlin: Springer; 2004.
18. Rao, R.V., Patel, V.: *Multi-objective optimization of two stage thermoelectric cooler using a mod-ified teaching-learning-based optimization algorithm*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*.2013; 26(1):430-445. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2012.02.016>
19. Michalewicz, Z.: *Genetic algorithms + data structures = evolution programming*. 3rd ed. Berlin: Springer Verlag; 1999.
20. Jantzen, J.: *Foundations of fuzzy control*. New Jersey: John Wiley and Sons; 2007.
21. E. Gawrilow, E. Köhler, R.H. Möhring, and B. Stenzel. Dynamic routing of automated guided ve-hicles in real-time. In H.-J. Krebs and W. Jäger, editors, *Mathematics: Key Technology for the Fu-ture*, pages 165–177. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
22. R.M. Lusby, J. Larsen, M. Ehrgott, and D. Ryan. Railway track allocation: models and methods. *OR Spectrum*, 33(4):843–883, 2011.
23. M. Skutella. An introduction to network flows over time. In W. Cook, L. Lovász, and J. Vygen, editors, *Research Trends in Combinatorial Optimization*, pages 451–482. Springer, Berlin, Heidel-berg, 2009.
24. Wang Hong-zhi, Zou Zao-jian. Numerical Prediction of Hydrodynamic Forces on A Ship Passing. Through A Lock. *China Ocean Eng.*, Vol. 28, No. 3, pp. 421 – 432. DOI 10.1007/s13344-014-0034-3, ISSN 0890-5487
25. Kokaev O.G. Integraciya vodnoj transportnoj struktury Rossii v Evropejskuyu transport-nuyu sistemu: problemy i resheniya. Transport Rossijskoj Federacii. 2007. № 9 (2). S. 36-41.
26. Trifanov V.N. Invariantnyj analiz i upravlenie v transportnyh sistemah. SPb.: EHMor, 2003.
27. Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A. Modelirovanie transportnyh potokov megapolisa c vvidom novyh vidov vodnogo vnutrigorodskogo passazhirskogo transporta. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2015. № 2 (30). S. 69-80.



## Научный журнал МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3

e-mail: mit-journal@mail.ru www.morintex.ru

### ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru) (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

По желанию авторов, документ 1 в бумажной версии и компакт-диск с документами 2 и 3 могут быть либо присланы по почте в адрес редакции, либо доставлены непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии. Оригинал акта экспертизы должен быть либо прислан по почте в адрес редакции, либо доставлен непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии.

**На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.**

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала. **Журнал публикуется в цветном варианте.**

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации 9000 рублей по выставяемому по запросу счету.**

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала  
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

**Есть на складе издательства****Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем  
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

**Архипов А. В., Рыбников Н. И.****Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов  
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

**Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И.****Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений.  
Учебник для вузов  
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

**Шауб П. А.****Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения  
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

**Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 г. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

**Гайкович А. И.****Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2  
СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**