

Федеральное агентство морского и речного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Волжский государственный университет водного транспорта



ISSN 2713-1858

Научные проблемы водного транспорта № 64 2020



# Научные проблемы водного транспорта

Вестник ВГАВТ

## №64

*Издается с 1930 года*



Нижний Новгород  
2020

Федеральное агентство морского и речного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Волжский государственный университет водного транспорта

# **НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА**

**Вестник ВГАВТ**

***Выпуск 64***

Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
Н. Новгород, 2020

УДК 33+55+62+65+72

В 38

В 38 Научные проблемы водного транспорта. Выпуск 64. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – 248 с.

**Редакция: журнала:**

Главный редактор	– Кузьмичев И.К. д.т.н., проф.
Первый заместитель главного редактора	– Минеев В.И. д.э.н., проф.
Заместитель главного редактора	– Корнев А.Б. к.т.н., доц.
Заместитель главного редактора	– Отделкин Н.С. д.т.н., проф.
Ответственный редактор	– Митрошин С.Г. к.т.н. доц.
Ответственный секретарь	– Раева О.А.

**Редакционная коллегия:**

Бажан П.И.	д.т.н., проф.	Безюков О.К.	д.т.н., проф.
Белых В.Н.	д.ф.-м.н., проф.	Бик Ю.И.	д.т.н., проф.
Ваганов А.Б.	д.т.н., доц.	Волков И.А.	д.ф.-м.н., проф.
Вычужанин В.В.	д.т.н., проф.	Гаврилов А.И.	д.э.н., проф.
Гири С.Н.	к.т.н., проф.	Грамузов Е.М.	д.т.н., проф.
Ермаков С.А.	д.ф.-м.н., проф.	Зуев В.А.	д.т.н., проф.
Иванов В.М.	к.т.н., проф.	Казаков Н.Н.	к.т.н., доц.
Клементьев А.Н.	д.т.н., проф.	Корнилов Д.А.	д.э.н., проф.
Королев Ю.Ю.	к.э.н., доц.	Костров В.Н.	д.э.н., проф.
Лаврентьева Е.А.	д.э.н., проф.	Мареев Е.А.	д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
Матвеев Ю.И.	д.т.н., проф.	Никущенко Д.В.	д.т.н., проф.
Мордовченков Н.В.	д.э.н., проф.	Озина А.М.	д.э.н., проф.
Роннов Е.П.	д.т.н., проф.	Ситнов А.Н.	д.т.н., проф.
Удалов О.Ф.	д.э.н., проф.	Уметалиев А.С.	д.э.н., проф.
Уртмицев Ю.Н.	д.т.н., проф.	Франк Венде	к.т.н., проф.
Цветков Ю.Н.	д.т.н., проф.		

**Редакционный совет журнала:**

Алексеев В.Я. – Генеральный директор ОАО «Порт Коломна»  
Бессмертный Д.Э. – Руководитель ФБУ «Администрация волжского бассейна», к.т.н.  
Ежов П.В. – Генеральный директор ООО «Си Тех»  
Ефремов Н.А. – Первый заместитель генерального директора ФАУ РРР, д.э.н.  
Мареев Е.А. – Заместитель директора ИПФ РАН по научной работе, д.ф.-м.н., профессор, член-корр. РАН  
Мочалина Н.Н. – Первый заместитель министра – начальник Управления природопользования Министерства экологии и природных ресурсов Нижегородской области  
Столповицкий К.С. – сотрудник проектного офиса по реализации реформы контрольной и надзорной деятельности Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации  
Теодор де Йонге – Генеральный директор «Numeriek Centrum Groningen B.V.», Нидерланды  
Франк Венде – Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg, ФРГ, PhD  
Шаталов В.В. – Генеральный директор ОАО КБ «Вымпел», профессор

«Научные проблемы водного транспорта» (старое название «Вестник ВГАВТ») – журнал широкой научной тематики, посвященный вопросам водного транспорта. Материалы выпуска рекомендуются научным сотрудникам, преподавателям высших учебных заведений, инженерам, аспирантам и студентам соответствующих специальностей

© ВГУВТ, 2020

# СОДЕРЖАНИЕ

## **Раздел I**

### **Судостроение, судоремонт и экологическая безопасность судна**

<b>Альчаков В.В., Крамарь В.А., Родькина А.В.</b> Вычислительная модель значений потенциалов корпусных сталей в морской воде.....	11
<b>Винцев А.В., Бурмистров Е.Г.</b> Тепловые деформации и потеря устойчивости при плазменной резке металла .....	27
<b>Гири С.Н.</b> Обоснование возможности эксплуатации некоторых грузовых судов в Онежском и Ладожском озерах без люковых закрытий.....	36
<b>Ермошкин А.В., Капустин И.А., Даниличева О.А., Поплавский Е.И., Русаков Н.С.</b> Исследование морфологических особенностей пленочных загрязнений на водной поверхности по данным радиолокационных наблюдений.....	48
<b>Лучков А.Н., Чебан Е.Ю., Журавлев Е.В.</b> Оценка применимости методов расчета коэффициента индуктивного сопротивления простого крыла с шайбами при полете у поверхности Земли .....	58
<b>Метелица С.С.</b> Обоснование выбора рациональных главных размерений при проектировании скоростных пассажирских катамаранов .....	70
<b>Мозговая М.Н., Бычков С.Н., Костылев К.А.</b> Проектирование системы опрокидывания всплывающего буя на стационарном течении в составе среднечастотного гидроакустического комплекса и исследование её характеристик .....	79
<b>Мольков А.А., Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Лазарева Т.Н., Лецёв Г.В.</b> Исследование визуального проявления оптоакустического эффекта в пленках на воде.....	89
<b>Осипов О.Н., Михеева Т.А.</b> Исследование применимости автоматизированных систем управления проектами на судостроительных заводах с единичным и мелкосерийным типами производства .....	99
<b>Перекрестов А.П., Саламех А., Чанчиков В.А., Гужвенко И.Н., Абубакаров А.Я.</b> Исследование эксплуатационных свойств противоизносных присадок для моторных смазочных масел в зависимости от процессов их обработки и седиментации .....	110
<b>Покусаев М.Н., Хмельницкий К.Е., Кадин А.А.</b> Оценка эффективности использования виброизолирующих устройств для подесных лодочных моторов .....	124

## **Раздел II**

### **Экономика, логистика и управление на транспорте**

**Калачев В.К., Карташов М.В.**

Интермодальные технологии перевозок грузов на паромов: современный аспект ..... 133

**Кегенбеков Ж.К., Конгуева А.Ж., Сапрыкина Н.М.**

Перспективы развития транспортно-логистического кластера в городе Алматы ..... 143

**Минеев В.И., Иванов В.М., Веселов Г.В., Иванов М.В.**

Концепция экономического обоснования размеров дотирования пассажирских перевозок внутренним водным транспортом ..... 154

**Никулина М.В., Подобед В.А.**

Особенности обоснования эффективности строительства речных причалов предприятий ..... 164

**Платов А.Ю., Платов Ю.И.**

Необходимые условия адекватности экономико-математических моделей на речном транспорте ..... 171

**Телегин А.И., Нюркин С.И., Нюркин А.В.**

Анализ требований технического регламента к грузовому речному терминалу для безопасной перегрузки и складирования автотранспортных средств ..... 180

**Уставщиков И.В.**

Совершенствование нормирования ходового времени и расхода топлива для речных судов в условиях цифровизации ..... 186

## **Раздел III**

### **Эксплуатация водного транспорта, судовождение и безопасность судоходства**

**Базылев А.В., Бычков В.Я., Перевезенцев С.В., Плющаев В.И.**

Аппаратно-программный комплекс для автоматической швартовки судов ..... 195

**Токарев П.Н.**

Аналитический расчет параметров маневра судна «разворот на месте» ..... 207

**Яблоков А.С., Борунов С.А., Девин А.Д., Шутков В.В.**

Оценка напряженно-деформированного состояния элементов траверсы грузоподъемностью 160 тонн ..... 215

## **Раздел IV**

### **Эксплуатация судового энергетического оборудования**

**Безюков О.К., Жуков В.А., Пуляев А.А.**

Установка для исследования кавитационных процессов в системах охлаждения судовых дизелей ..... 235

Federal Agency of Sea and River Transport  
Volga State University of Water Transport

**RUSSIAN JOURNAL  
OF WATER TRANSPORT**

***Issue 64***

VSUWT publishing house  
N. Novgorod, 2020

Editor-in-chief	– D.Sc.(Tech.) Professor Kuzmichev I.K.
First Deputy Editor	– D.Sc.(Econ.), Professor Mineev V.I.
Deputy Editor-in-chief	– Ph.D. Associate Professor.Kornev A.B
Deputy Editor-in-chief	– D.Sc.(Tech.) Professor Otdelkin N.S.
Contributing Editor	– Ph.D. Associate Professor.Mitroshin S.G.
Executive secretary	– Raeva O.A.

#### **The Editorial Board: of the journal**

Bazhan P.I.	D.Sc.(Tech.), Professor	Bezyukov O.K.	D.Sc.(Tech.), Professor
Belykh V.N.	D.Sc.(Phys.&Math.), Prof.	Bik Y.I.	D.Sc.(Tech.), Professor
Vaganov A.B.	Ph.D. Associate Professor	Volkov I.A.	D.Sc.(Phys.&Math.), Prof.
Vychuzhanin V.V.	D.Sc.(Tech.), Professor	Gavrilov A.I.	Ph.D.(Econ.), Professor
Girin S.N.	Ph.D. Associate Professor	Gramuzov E.M.	D.Sc.(Tech.), Professor
Ermakov S.A.	D.Sc.(Phys.&Math.), Prof.	Zuev V.A.	D.Sc.(Tech.), Professor
Ivanov V.M.	Ph.D. Associate Professor	Kazakov N.N	Ph.D. Associate Professor
Klement'ev A.N.	D.Sc.(Tech.), Professor	Kornilov D.A.	Ph.D.(Econ.), Professor
Korolev Y.Y.	Ph.D. Associate Professor	Kostrov V.N	D.Sc.(Econ.), Professor
Lavrentieva E.A.	Ph.D.(Econ.), Professor	Mareev E.A.	D.Sc.(Phys.&Math.), Prof.
Matveev Y.I.	D.Sc.(Tech.), Professor	Nikushenko D.V.	D.Sc.(Tech.), Professor
Mordovchenkov N.V.	D.Sc.(Econ.), Professor	Ozina A.M.	Ph.D.(Econ.), Professor
Ronnov E.P.	D.Sc.(Tech.), Professor	Sitnov A.N.	D.Sc.(Tech.), Professor
Udalov O.F.	Ph.D.(Econ.), Professor	Umetaliev A.S.	Ph.D.(Econ.), Professor
Urtmintsev Y.N.	D.Sc.(Tech.), Professor	Frank Vende	Ph.D. Associate Professor
Tsvetkov Yu.N.	D.Sc.(Tech.), Professor		

#### **The Editorial Council of the journal**

Alekseev V.J. – General Director of JSC «Port Kolomna»  
Bessmertnui D.E. – The head of the FBI «The administration of the Volga basin», Ph.D.  
Ezov P.V. – General Director of «Sea Tech»  
Efremov, NA – First Deputy General Director of the State PPP, Ph.D.  
Mareev EA – Deputy Director of the IAP RAS on scientific work, Dr., Professor, Corresponding Member. RAS  
Mochalina N. N. – First Deputy Minister – the head of the Natural Resources Department of the Nizhny Novgorod region Ecology and Natural Resources Ministry  
Sazonov I.G. – Deputy Minister of Industry of Nizhny Novgorod Region  
Stolovitsky K. S. - manager of the project office for the implementation of the reform of the control and supervisory activities of the Analytical Center under the Government of the Russian Federation  
Theodore de Jonge – General Director of «Numeriek Centrum Groningen BV», The Netherlands  
Frank Wende – Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg, Germany, PhD.  
Shatalov V.V. – General Director of CB «Vympel», Professor

# CONTENTS

## **Section I**

### **Shipbuilding, ship repair, and ecological safety of the ship**

<i>Alchakov V.V., Kramar V.A., Rodkina A.V.</i> Computational model of hull steel potential values in sea water .....	11
<i>Vintsiv A.N., Burmistrov E.G.</i> Thermal deformation and the loss of stability during plasma cutting of metal .....	27
<i>Girin S.N.</i> Grouns for the possibility of operation of some cargo vessels in Onezhskoe and Ladzhskoe lakes without hatch covers .....	36
<i>Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Danilicheva O.A., Poplavsky E.I., Rusakov N.S.</i> Investigation of morphological features of film pollution on water surface based on radar sensing data .....	48
<i>Luchkov A.N., Cheban E.Yu., Zhuravlev E.V.</i> The estimation of applicability concerning the methods for calculation of a simple wing with wingtips inductive resistance during the flight near the earth surface .....	58
<i>Metelitsa S.S.</i> The rational main dimensions in the design of high-speed passenger catamarans choice justification .....	70
<i>Mozgovaya M.N., Bychkov S.N., Kostylev K.A.</i> The deploying buoying system design in a stationary flow as a part of a medium-frequency hydro-acoustic complex and its characteristics research .....	79
<i>Molkov A.A., Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Lazareva T.N., Leshchev G.V.</i> The visual manifestation of the optoacoustic effect in films on water .....	89
<i>Osipov O.N., Mikheeva T.A.</i> A study on applicability of automated project management systems at shipbuilding plants with a single and small-scale production types .....	99
<i>Perekrestov A.P.</i> A study on operational properties of anti-wear additives for motor lubricating oils depending on their processing and sedimentation .....	110
<i>Pokusaev M.N., Khmel'nitsky K.E., Kadin A.A.</i> Evaluating the effectiveness of vibration-insulating devices use for outboard motors .....	124

## **Section II**

### **Economics, logistics and transport management**

<i>Kalachev V.K., Kartashov M.V.</i> Intermodal cargo transportation technologies on ferries: a modern aspect .....	133
<i>Kegenbekov Zh.K., Kongueva A.K., Saprykina N.M.</i> Transport and logistics cluster development prospects in the city of almaty .....	143

<b><i>Mineev V.I., Ivanov V.M., Veselov G.V., Ivanov M.V.</i></b>	
The concept of economic substantiation of passenger transportation subsidizing by Inland water transport.....	154
<b><i>Nikulina M.V., Podobed V.A.</i></b>	
The features of effectiveness substantiation for construction of river piers of enterprises.....	164
<b><i>Platov A.J., Platov J.I.</i></b>	
Necessary conditions for the adequacy of economic and mathematical models on river transport .....	171
<b><i>Telegin A.I., Nyurkin S.I., Nyurkin A.V.</i></b>	
Analysis of technical regulations requirements to the cargo river terminal for the safe handling and storage of motor vehicles .....	180
<b><i>Ustavshchikov I.V.</i></b>	
The improvement of rationing running time and fuel consumption for river vessels in the context of digitalization .....	186

### **Section III**

#### **Operation of water transport, navigation and safety of navigation**

<b><i>Bazylev A.V., Bychkov V.Y., Perevezentsev S.V., Plyushchaev V.I.</i></b>	
Hardware and software complex for automatic mooring.....	195
<b><i>Tokarev P.N.</i></b>	
Analytical calculation of the parameters of the maneuver of the ship «u-turn in place» ....	207
<b><i>Yablokov A.S., Borunov S.A., Devin A.D., Shutov V.V.</i></b>	
Evaluation of stressed-deformed conditions of elements traverse with load capacity of 160 tons .....	215

### **Section IV**

#### **Operation of ship power equipment**

<b><i>Bezjukov O.K., Zhukov V.A., Puljaev A.A.</i></b>	
The installation for the research of cavitation processes in cooling systems of marine diesel engines.....	235

# **Раздел I**

**Судостроение, судоремонт  
и экологическая безопасность судна**



# **Section I**

***Shipbuilding, ship repair,  
and ecological safety of the ship***



УДК 629.5:620.197.5

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.93>

## **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЗНАЧЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛОВ КОРПУСНЫХ СТАЛЕЙ В МОРСКОЙ ВОДЕ**

**В.В. Альчаков**

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,*

*г. Севастополь, Россия*

*ORCID: 0000-0002-1392-1699*

**В.А. Крамарь**

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,*

*г. Севастополь, Россия*

*ORCID: 0000-0002-0528-1978*

**А.В. Родькина**

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,*

*г. Севастополь, Россия*

*ORCID: 0000-0002-4593-4259*

*Аннотация. В статье приведен анализ существующих моделей нейронных сетей. Описаны особенности построения нейронной сети с использованием нескольких параметров, влияющих на выходную величину. Выявлены преимущества использования нейронных сетей и вычислительных систем на их основе. Поставленная задача была решена с использованием языка программирования Python. Разработана вычислительная модель значений потенциала стали с оксидной пленкой и потенциала стали без оксидной пленки для различной солености морской воды и различных видов корпусных сталей, применяемых для корпусов морских судов и подводных конструкций океанотехнических сооружений, проектируемых для Черноморского бассейна Севастопольского региона и эксплуатирующихся в этом регионе. Полученные результаты работы позволят повысить точность прогнозирования потенциалов для различных марок корпусных сталей.*

*Ключевые слова: нейронные сети, корпусные стали, морские суда, океанотехнические сооружения, потенциал, слои, веса, пороги.*

### **Введение**

Постоянное развитие математического и алгоритмического аппарата нейронных сетей (НС) открывает новые возможности для получения высокоточных моделей различных процессов и явлений, наблюдаемых в морской среде. Среди таких процессов можно выделить явления в металлических конструкциях и сооружениях морского назначения, для которых исследование корреляции параметров, влияющих на надежность конструкций, является актуальной задачей, решение которой может быть получено с помощью мощнейшего аппарата НС. При этом НС могут быть использованы для изучения и исследования как статистических, так и динамических свойств объектов, что дает возможность получения точных оценок неизвестных параметров на основании исторических данных об исследуемом процессе или явлении. В работе [1] получены результаты применения НС для прогнозирования величины потенциала стали на ювенильной поверхности, однако при расчетах не было учтено влияние катодной поляризации, что могло повлиять на точность полученных нейросетевых моделей и соответствующих оценок исследуемых параметров, а соответственно не позволяет обеспечить должную защиту от локальных форм коррозионно-механических разрушений корпусных сталей морских судов и океанотехнических сооружений, про-

ектируемых для Черноморского бассейна Севастопольского региона и эксплуатирующихся в этом регионе.

В качестве эффективного инструмента для изучения процесса коррозии были использованы многие методы, основанные на алгоритме машинного обучения, такие как модель нейронной сети обратного распространения (BPNN), модель нейронной сети с радиальной базисной функцией (RBF), модель опорных векторов (SVM), модель самоорганизующихся карт (SOM) и модель теории Грея. Интеллектуальный алгоритм часто используется для прогнозирования плотности коррозии в стальных железобетонных конструкциях, потенциала поляризации, плотности рассеянного тока, потери массы [2], скорости коррозии, классификации опасности коррозии и т. д. НС широко используется в области прогнозирования коррозии. Основным преимуществом НС являются существенные возможности в установлении нелинейных связей между входными и выходными наборами данных о коррозии.

НС играют большую роль как средство для внедрения экспертных систем на основании того, что даже с одним скрытым слоем и соответствующим образом выбранным числом нейронов НС может приближаться к любой непрерывной функции.

Основой НС является искусственный нейрон, который был разработан, чтобы имитировать характеристику биологического нейрона. МакКаллок и Питс предложили двоичную пороговую единицу в качестве вычислительной модели для нейрона. Схематическая диаграмма нейрона показана на рис. 1 [3].

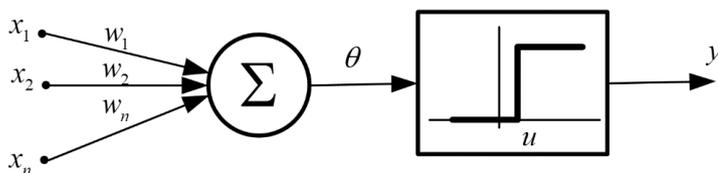


Рис. 1. Схематическая диаграмма нейрона

Принцип действия нейрона, изображенного на рис. 1 состоит в следующем. На вход нейрона поступают сигналы  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  при этом каждый сигнал имеет свой вес  $w_i$ . Сумма взвешенных входных сигналов сравнивается с заданным пороговым значением  $u$ , если сумма превышает  $u$ , величина выходного сигнала принимается равной «1», в противном случае на выходе формируется «0». Математическая запись алгоритма работы нейрона имеет вид

$$y = \theta \left( \sum_{i=1}^n w_i x_i - u \right),$$

где  $\theta(\cdot)$  – пороговая функция (которая представляет функцию активации),  $w_i$  – вес синапса  $p$ , связанный с  $j$ -м входом [3].

Доказано, что при правильно выбранных весах синхронное расположение таких нейронов в принципе способно к универсальным вычислениям.

При решении различных задач могут использоваться функции активации, отличные от указанной пороговой функции, например, кусочно-линейная, сигмоидальная или гауссовская.

Пороговая функция определяется как

$$y = \theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

Логистическая функция является стандартной сигмоидальной функцией и определяется как

$$y = \theta(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}}. \quad (1)$$

Сигмовидная функция является наиболее часто используемой функцией в НС. Это гладкая строго возрастающая непрерывная функция.

Гиперболический тангенс определяется как

$$y = \theta(x) = \tanh(x) \frac{e^{\beta x} - e^{-\beta x}}{e^{\beta x} + e^{-\beta x}}. \quad (2)$$

Кусочно-линейная функция определяется с помощью следующего соотношения

$$y = \theta(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq -1 \\ \frac{x+1}{2} & \text{if } -1 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{if } x \geq 1 \end{cases}.$$

Гауссова функция определяется выражением

$$y = \theta(x) = \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $\sigma$  – дисперсия, параметр, значение которого управляет свойствами гладкости интерполирующей функции.

НС можно рассматривать как взвешенные ориентированные графы, в которых узлы являются искусственными нейронами и направленные ребра с весами являются соединениями от выходов нейронов до входов нейронов. Архитектура соединения НС могут быть сгруппированы в две основные категории [4]. Первая категория – это сети с прямой связью, в которой на графике нет петель, а вторая – сети с обратной связью (или рекуррентные сети), в которых существуют петли из-за соединений с обратной связью. Наиболее распространенное семейство сетей с прямой связью – это многоуровневая нейронная сеть, в которой нейроны организованы в слои со связями строго в одном направлении от одного уровня к другому.

Разные возможности подключения приводят к разному поведению нейронных сетей. Нейронные сети с прямой связью являются статическими сетями, т. е. при вводе они генерируют только один набор выходных значений, а не последовательность значений. Сети с прямой связью не зависят от предыдущего состояния сети. Рекуррентные сети являются динамическими системами. При представлении нового шаблона ввода вычисляются выходы нейронов. Из-за обратной связи входы в каждый нейрон модифицируются, что приводит сеть в новое состояние.

Наиболее популярными искусственными нейронными сетями являются многослойные перцептроны. Также рассматриваются НС с радиальной базисной функцией (RBFNN). Эти сети доказали свою универсальность в качестве аппроксиматора, что позволяет использовать их для аппроксимации непрерывных многомерных функций с заданной степенью точности (при наличии необходимого количества нейронов в скрытом слое НС) [5].

Рассмотрим два типа нейронных сетей с прямыми связями [6, 7], которые получили наиболее широкое распространение, также описывается преимущество использования нейронных сетей с практической точки зрения.

### **Нейронные сети прямого распространения**

*Однослойный перцептрон.* Простейшая из существующих нейронных сетей представляет собой так называемый перцептрон. Перцептрон имеет много несколько вхо-

дов полностью соединенных с выходным слоем посредством нескольких нейронов МакКаллока-Питса [8] (рис. 2).

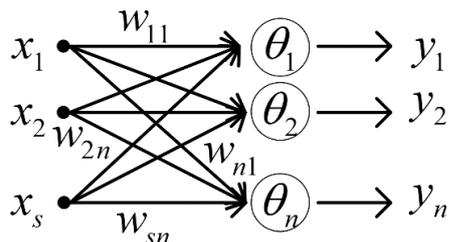


Рис. 2. Персептрон с s входами и n выходами

Каждый вход  $x_i$  умножается на весовой коэффициент  $w_{ij}$  перед тем как попасть в обрабатывающий элемент  $\theta_j$  и на выходной слой  $y_j$

$$y_j = \theta(\text{net}_j) = \theta_j \left( \sum_{i=1}^s w_{ij} x_i + b_j \right), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

В соотношении (3)  $\theta_j$  представляет собой пороговую функцию, а параметр  $b_j$  – соответствующая величина смещения. Количество выходов как правило определяется числом классов, на которые разбиты входные данные. Эти элементы обеспечивают масштабирование всего пространства входных сигналов и их влияние на выход системы.

Цель персептрона проиллюстрирована на рис. 3. На рисунке показаны два класса входных данных (в простейшем случае можно использовать бинарную классификацию, тогда нулем можно обозначить один класс, а единицей – другой). Задача использования персептрона сводится к поиску уравнения гиперплоскости, которая позволит однозначно отделить экземпляры класса 0 от экземпляров класса 1. В двухмерном пространстве такая гиперплоскость представляет собой линию, в трехмерном – плоскость, в s-мерном пространстве – поверхность размерности s-1 [7].

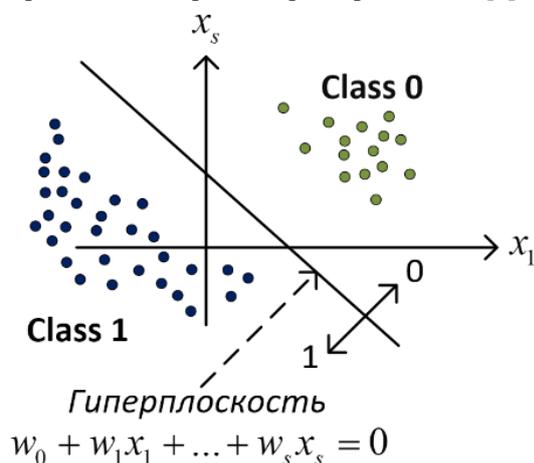


Рис. 3. Представление задачи классификации

Для определения набора весов  $w_0, w_1, \dots, w_s$  для каждого выхода персептрона (каждый из которых будет соответствовать одному из классов на которые разделены входные данные). Вектор весов  $w$  персептрона определяет гиперплоскость в s-мерном пространстве. Если одна из точек  $x_0, x_1, \dots, x_s$  лежит в плоскости, элементы которой

классифицируются как класс 0, то выход персептрона также равен 0. Если точка лежит в плоскости, содержащей элементы класса 1, то выход персептрона также равен 1. В приведенном на рис. 3. случае персептрон будет работать правильно благодаря тому, что гиперплоскость сориентирована правильно с точки зрения выявления двух линейно-разделяемых классов.

**Многослойный персептрон.** Многослойный персептрон является расширением однослойного персептрона, внутри которого появляются новые слои, которые не подключены непосредственно к выходам системы. На рис. 4. представлен многослойный персептрон с одним скрытым слоем. Таким образом, всего можно выделить три различных слоя: входной (с  $s$  входами), скрытый (содержит  $n$  слоев) и выходной ( $l$  слоев) [7, 9].

Каждый элемент входного уровня может быть соединен с элементом скрытого уровня с помощью связи, имеющей вес  $w_{ij}$ , описываемый вещественным числом. В большинстве случаев каждый входной элемент имеет связь с элементом скрытого уровня. Предположим, что входной сигнал  $x_i$  соединен с  $j$ -м элементом скрытого уровня, при этом вес этой связи равен  $w_{ij}$ . Это означает что на вход  $j$ -го элемента скрытого уровня поступит не сигнал  $x_i$ , а сигнал, величина которого определяется выражением  $x_i w_{ij}$ . Тогда, общий сигнал, который поступает на вход  $j$ -го элемента скры-

того уровня может быть описан с помощью соотношения  $\sum_{i=1}^s x_i w_{ij}$ .

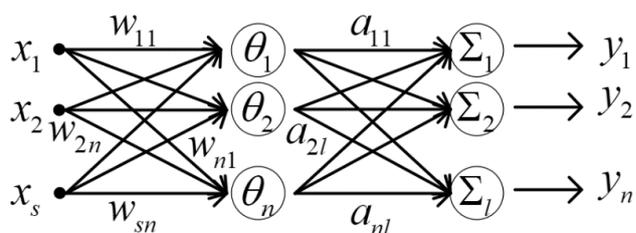


Рис. 4. Структура многослойного персептрона

Далее,  $j$ -й элемент скрытого уровня (обозначим его  $\theta_j$ ) обрабатывает входной суммарный сигнал по определенному правилу. Обычно это правило описывается непрерывной сигмоидной функцией и называется функцией активации. Как правило, функция активации может быть записана как логистическая функция (1) или функция гиперболического тангенса (2).

Сигнал, полученный на выходе  $p$ -го элемента скрытого слоя, передается на  $l$ -й элемент выходного слоя с некоторым весом  $a_{pl}$ , который также описывается вещественным числом. Тогда, каждый выходной элемент нейронной сети представляет собой линейную комбинацию сигмоидных функций [7]. В этом общем случае для элемента на выходе внешнего слоя сети можно записать следующее выражение

$$y_k = \sum_{j=1}^n a_{kj} \theta_j \left( \sum_{i=1}^s w_{ij} x_i + b_j \right), \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

Соотношение (4) может быть обобщено на более общий случай, когда количество скрытых слоев нейронной сети больше 1.

Для повышения эффективности нейронной сети выполняется нормирование значений обучающей выборки:

$$\xi' = \frac{\xi - \xi_{min}}{\xi_{max} - \xi_{min}} \quad (5)$$

где  $\xi$  – необработанные данные образца,

$\xi_{min}$  и  $\xi_{max}$  – максимальные и минимальные исходные данные образца соответственно

$\xi'$  – нормированные данные между 0 и 1.

### Построение НС с использованием нескольких параметров, влияющих на выходную величину

Наборы данных, используемые для обучения нейронных сетей, достаточно часто используют сведения лишь об одном параметре, влияющем на величину неизвестного выходного параметра. Для повышения точности расчетов иногда, при наличии технических возможностей предлагается метод повышения качества прогноза, с помощью введения в обучающую выборку дополнительных параметров, влияющих на прогнозируемый параметр.

При решении задач прогнозирования временных рядов, как правило, используются структуры НС, представляющие собой многослойные, в частности, трехслойные НС. Обобщенная структура такой сети представлена на рис. 5.

В таком случае в качестве входных сигналов, поступающих на вход НС, являются значения параметров, которые определяют наиболее значимые факторы, процессы и явления, влияющие на формирование выходного сигнала, называемым прогнозом или оценкой неизвестного выходного параметра. Количество входных параметров может изменяться в диапазоне от 1 до  $N$  (где  $N$  – натуральное число). Количество нейронов скрытого слоя обозначается через  $M$  и подлежит определению.

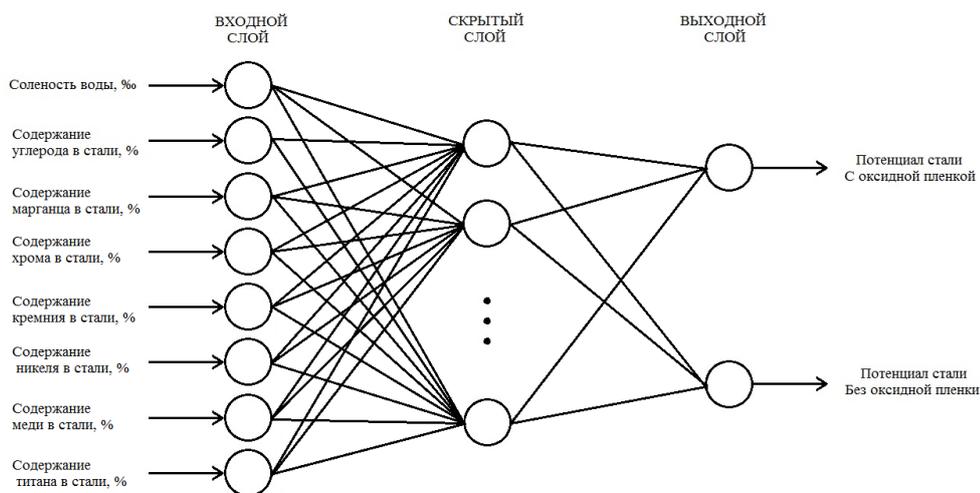


Рис. 5. Структура нейронной сети для прогнозирования

С точки зрения математического описания, постановка задачи может быть представлена в виде.

Пусть задана некоторая выборка  $\{x_i, y_i\}_{i=1}^n$ , где  $x_i$  – вектор значений входных параметров, влияющих на выходной параметр  $y_i$ . Величина параметра  $n$  определяет размер такой выборки с точки зрения доступных исторических значений наблюдаемого процесса или явления. Ставится задача построения НС, которая будет использоваться для получения прогноза выходного параметра в виде  $\hat{y} = f(x)$ . В случае, если число входных или выходных параметров больше 1 (что соответствует многофактор-

ному или многомерному случаю) соответствующий прогноз может быть записан в матричном виде  $\hat{Y} = f(X)$ .

Следует учитывать, что имеющиеся в наличии исторические данные будут использоваться не только для обучения, но также и для верификации модели. При этом не рекомендуется использовать исторические данные обучающей выборки для тестирования и наоборот. В противном случае может произойти так называемое переобучение модели, что значительно ухудшит точность получаемых оценок для новых входных данных.

Исходные исторические данные не могут быть использованы «как есть», перед обучением НС прибегают к различным методам предварительной обработки данных, в частности, к масштабированию и нормированию исходной последовательности. В частности, соотношение (5) может быть использовано для нормирования каждого из входных и выходных параметров в диапазоне  $[0...1]$ . Такой подход является рекомендуемым и его применение позволяет повысить как качество, так и скорость обучения НС, что очень важно, например, для систем реального времени, в которых используется переобучение моделей с учетом новых исторических данных.

После того, как закончена предварительная обработка данных, переходят к расчётам количественных характеристик НС. К таким характеристикам относятся число входов НС, число выходов НС, а также длина исторической выборки, которая будет использована для обучения НС. Предположим, что проектируемая сеть будет иметь один скрытый слой и один выходной параметр, тогда, обозначив через  $N_x$  число входных параметров сети, влияющих на выходной параметр, а через  $N_y = 1$  число выходов НС можно записать выражение для определения необходимого числа синоптических весов  $N_w$ , которое должно удовлетворять неравенству [10]

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left( \frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y.$$

Далее, необходимое число нейронов скрытого слоя может быть получено по формуле

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y}.$$

Исходя из полученных значений параметров  $N_w$  и  $N$  можно воспользоваться неравенством

$$\frac{Q}{10} - N_x - N_y \leq N \leq \frac{Q}{2} - N_x - N_y,$$

где  $Q$  – размер выборки, используемой для обучения НС, который равняется 75–80% от размера общей исторической выборки. Остальные 25–20% данных используются для верификации работы построенной НС.

### **Преимущества использования нейронных сетей и вычислительных систем на их основе**

Перечислим основные преимущества использования нейронных сетей по сравнению со стандартными вычислительными схемами.

Адаптивные свойства. Нейронные сети способны изменять свои параметры в соответствии с меняющимися условиями функционирования, т.е. обладают способностью решать новые задачи на основе данных, которые были представлены для обучения или начальной подготовки сети.

Самоорганизация. Искусственная нейронная сеть может самостоятельно создать или изменить свою собственную организацию на основании той информации, которая поступает в момент обучений или переобучения сети.

Функционирование в режиме реального времени. Вычисления искусственных нейронных сетей могут выполняться параллельно, при этом вычисления могут быть выполнены с помощью специализированных аппаратных вычислительных устройств в реальном масштабе времени. Это позволяет использовать вычислительные процедуры, в основе которых лежат нейронные сети, на бортовых устройствах различных устройств, требующих получения сигналов управления в реальном масштабе времени.

Высокая отказоустойчивость. Благодаря тому, что при обучении нейронных сетей зачастую используется избыточная информация, отказоустойчивость систем на их основе возрастает. Также частичное разрушение нейронной сети приводит к снижению производительности, однако может быть скомпенсировано за счет неповрежденных участков.

Параллелизм. Параллелизм является фундаментальным в архитектуре нейронных сетей, когда нейроны рассматриваются как наборы элементарных единиц. Работая одновременно, можно получить большую скорость вычисления.

### **Практическая реализация построения вычислительной модели значения потенциалов корпусных сталей в морской воде**

В последнее время для исследования данных и построения нейросетевых вычислительных моделей ученые и инженеры всего мира прибегают к использованию высокоуровневого языка программирования Python. Возможности этого языка делают его незаменимым инструментом инженеров и исследователей, работающих с большими данными, в том числе и для построения нейронных сетей на основе этих данных [11]. Одним из важнейших преимуществ Python является наличие большого количества свободно распространяемых пакетов для анализа и визуализации данных, которые значительно упрощают сам процесс исследования и обработки данных. При этом сами пакеты, как и базовое ядро Python, позволяют получать кроссплатформенные решения без привязки и необходимости адаптации к какой-либо конкретной операционной системе, платформе или фреймворку. Перечисленные особенности Python позволяют расширить область применения языка за счет таких пакетов как NumPy (пакет для работы с одномерными данными в виде массивов), Pandas (пакет для работы с неоднородными и поименованными данными), SciPy (пакет для решения общих научных вычислительных задач), Matplotlib (пакет для визуального представления наборов данных), Scikit-Learn (пакет для решения задач машинного обучения), IPython и Jupyter (пакет, позволяющий создать вычислительную интерактивную среду, для легкого обмена созданными скриптами).

Именно этот набор инструментов далее будет использован для апробации предложенных подходов и проверки сделанных теоретических утверждений.

Цель построения вычислительной модели: прогнозирование значений потенциалов различных видов корпусных сталей с оксидной пленкой и без оксидной пленки при различной солености морской воды, применяемых для корпусов морских судов и подводных конструкций океанотехнических сооружений.

Для формирования вычислительной модели значения потенциалов корпусных сталей в морской воде нужна пара векторов: входные и выходные параметры. Для достижения поставленной цели вектор входных параметров состоит из восьми элементов: солености морской воды, процентного содержания углерода и легирующих элементов (марганец, хром, кремний, никель, медь, титан) в стали. Вектор выходных параметров состоит из двух элементов: потенциала стали с оксидной пленкой, мВ; потенциала стали без оксидной пленки, мВ (таблица 1, 2 [12]).

Таблица 1

**Выборка для обучения нейронной сети**

Марка стали	Соленость воды, ‰	Содержание в стали, %							Потенциал стали -ф, мВ	
		углерод	марганец	хром	кремний	никель	медь	титан	с оксидной пленки	без оксидной пленки
	<i>В Х</i>	<i>О Д</i>	<i>Н О</i>	<i>Й</i>	<i>С</i>	<i>Л</i>	<i>О</i>	<i>Й</i>	<i>ВЫХОДНОЙ СЛОЙ</i>	
Ст3	18	0.18	0.53	0.3	0.23	0.3	0.3	0	494.00	410.17
09Г2	18	0.12	1.6	0.3	0.27	0.3	0.3	0	520.33	435.17
20Х13	18	0.21	0.8	13	0.8	0	0	0	171.33	469.00
10ХСНД	18	0.12	0.65	0.75	0.95	0.65	0.5	0	529.67	440.33
12Х18Н10Т	18	0.12	2	18	0.8	10	0	0.7	448.00	491.00
Ст3	20	0.18	0.53	0.3	0.23	0.3	0.3	0	510.00	438.33
09Г2	20	0.12	1.6	0.3	0.27	0.3	0.3	0	538.67	441.50
20Х13	20	0.21	0.8	13	0.8	0	0	0	123.00	542.17
10ХСНД	20	0.12	0.65	0.75	0.95	0.65	0.5	0	551.33	457.67
09Г2	22	0.12	1.6	0.3	0.27	0.3	0.3	0	534.67	447.50
20Х13	22	0.21	0.8	13	0.8	0	0	0	162.00	509.67
10ХСНД	22	0.12	0.65	0.75	0.95	0.65	0.5	0	556.00	457.17
12Х18Н10Т	22	0.12	2	18	0.8	10	0	0.7	436.67	492.33
Ст3	24	0.18	0.53	0.3	0.23	0.3	0.3	0	562.33	437.33
20Х13	24	0.21	0.8	13	0.8	0	0	0	138.00	534.00
10ХСНД	24	0.12	0.65	0.75	0.95	0.65	0.5	0	517.00	439.17
12Х18Н10Т	24	0.12	2	18	0.8	10	0	0.7	430.33	536.83
Ст3	26	0.18	0.53	0.3	0.23	0.3	0.3	0	519.67	415.67
09Г2	26	0.12	1.6	0.3	0.27	0.3	0.3	0	513.00	431.83
10ХСНД	26	0.12	0.65	0.75	0.95	0.65	0.5	0	539.00	452.50
12Х18Н10Т	26	0.12	2	18	0.8	10	0	0.7	440.33	525.50
Ст3	28	0.18	0.53	0.3	0.23	0.3	0.3	0	507.00	424.33
09Г2	28	0.12	1.6	0.3	0.27	0.3	0.3	0	525.33	434.17
20Х13	28	0.21	0.8	13	0.8	0	0	0	164.67	466.83
12Х18Н10Т	28	0.12	2	18	0.8	10	0	0.7	441.00	516.50
Ст3	30	0.18	0.53	0.3	0.23	0.3	0.3	0	505.33	432.33
09Г2	30	0.12	1.6	0.3	0.27	0.3	0.3	0	527.33	428.17
20Х13	30	0.21	0.8	13	0.8	0	0	0	167.33	458.00
10ХСНД	30	0.12	0.65	0.75	0.95	0.65	0.5	0	535.33	441.17
12Х18Н10Т	30	0.12	2	18	0.8	10	0	0.7	437.33	504.00

Таблица 2

**Выборка для проверки нейронной сети**

Марка стали	Соленость воды, ‰	Содержание в стали, %							Потенциал стали -ф, мВ	
		углерод	марганец	хром	кремний	никель	медь	титан	с оксидной пленки	без оксидной пленки
	<i>В Х</i>	<i>О Д</i>	<i>Н О</i>	<i>Й</i>	<i>С</i>	<i>Л</i>	<i>О</i>	<i>Й</i>	<i>ВЫХОДНОЙ СЛОЙ</i>	
12Х18Н10Т	20	0.12	2	18	0.8	10	0	0.7	356.67	347.17
Ст3	22	0.18	0.53	0.3	0.23	0.3	0.3	0	538.00	434.33
09Г2	24	0.12	1.6	0.3	0.27	0.3	0.3	0	502.00	428.33
20Х13	26	0.21	0.8	13	0.8	0	0	0	167.00	459.00
10ХСНД	28	0.12	0.65	0.75	0.95	0.65	0.5	0	533.67	446.67

Помимо построения моделей, немаловажную роль играет предварительная подготовка и анализ данных. Исходные данные могут храниться в различных форматах, однако наиболее распространенным с точки зрения использования в системах анализа данных является формат Comma Separated Values (CSV). Это простой текстовый формат, в котором данные разделены с помощью определенного символа (как правило, «,» или «;» – в зависимости от региональных настроек операционной системы). Для загрузки и манипуляции с табличными данными, как правило, используется пакет Pandas. Фрагмент кода для подключения необходимых библиотек и загрузке наборов данных для обучения и тестирования приведен на рис. 6.

```
In [1]: # Подключение необходимых библиотек для анализа данных
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Метод опорных векторов
from sklearn.svm import SVR

# Полиномиальные модели
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.pipeline import make_pipeline

def PolynomialRegression(degree=2, **kwargs):
    return make_pipeline(PolynomialFeatures(degree),
                        LinearRegression(**kwargs))

In [2]: # Загрузка исходных данных
data_train = pd.read_csv("D:\\DataSet\\corrosion-control\\data-train.csv")
data_test = pd.read_csv("D:\\DataSet\\corrosion-control\\data-test.csv")
# Просмотр первых строк таблиц данных
```

Рис. 6. Подключение библиотек и загрузка исходных данных

Однако в исходном виде данные не могут быть использованы. Это объясняется тем, что первый столбец в таблицах данных содержит в себе текстовые метки, соответствующие наименованиям марок стали, которые не могут быть переданы в модель для обучения в первоначальном виде. Поэтому на первом этапе предварительной обработки данных каждой марки стали присваивается свой уникальный числовой индекс (рис. 7).

Далее размеченные данные разделяются на две части. Первая часть представляет собой наборы признаков (для рассматриваемой задачи набор признаков состоит из марки стали, солености морской воды и содержания в стали различных примесей). Эти данные будут использоваться в качестве входных наборов. Последние два столбца – потенциалы стали с оксидной пленкой и без нее, будут использованы в качестве отдельных выходных векторов и представляют собой сигналы на выходе вычислительных моделей. Таким образом, будут построены отдельные модели для вычисления потенциала с оксидной пленкой и без оксидной пленки (рис. 8). Для разбивки данных на входные и выходные выборки также наилучшим образом подходит библиотека Pandas.

```
In [3]: print("Данные для обучения")  
data_train.head()
```

Данные для обучения

Out[3]:

	steelmark	salinity	carbon	manganese	chromium	silicon	nickel	copper	titanium
0	Ст3	18	0.18	0.53	0.30	0.23	0.30	0.3	0
1	09Г2	18	0.12	1.60	0.30	0.27	0.30	0.3	0

```
In [6]: print("Данные для обучения после разметки")  
data_train.head()
```

Данные для обучения после разметки

Out[6]:

	steelmark	salinity	carbon	manganese	chromium	silicon	nickel	copper	titanium
0	1	18	0.18	0.53	0.30	0.23	0.30	0.3	0.0
1	2	18	0.12	1.60	0.30	0.27	0.30	0.3	0.0
2	3	18	0.21	0.80	13.00	0.80	0.00	0.0	0.0
3	4	18	0.12	0.65	0.75	0.95	0.65	0.5	0.0
4	5	18	0.12	2.00	18.00	0.80	10.00	0.0	0.7

Рис. 7. Данные для обучения модели до и после разметки

```
In [8]: ## Разбивка данных на входные и выходные последовательности  
# Марка стали, соленость, содержание стали  
X = data_train.iloc[:, 0:9]  
# Потенциал стали с оксидной пленкой  
Y1 = data_train.iloc[:, 9]  
# Потенциал стали без оксидной пленкой  
Y2 = data_train.iloc[:, 10]  
X_test = data_test.iloc[:, 0:9]  
Y1_test = data_test.iloc[:, 9]  
Y2_test = data_test.iloc[:, 10]
```

Рис. 8. Разбивка данных на входные и выходные последовательности

Построение вычислительных моделей будет выполнено с помощью функций библиотеки Scikit-Learn, пожалуй, наиболее мощной библиотеки для машинного обучения в Python. Первая группа моделей будет построена на базе полиномиальной регрессии с различной степенью аппроксимирующих полиномов.

Были построены модели 3-й, 5-й и 7-й степени (рис. 9).

```
In [11]: ## Построение полиномиальных моделей  
# Построение модели 2-й степени  
Y1_predict_2 = PolynomialRegression(2).fit(X, Y1).predict(X_test)  
Y2_predict_2 = PolynomialRegression(2).fit(X, Y2).predict(X_test)  
# Построение модели 3-й степени  
Y1_predict_3 = PolynomialRegression(3).fit(X, Y1).predict(X_test)  
Y2_predict_3 = PolynomialRegression(3).fit(X, Y2).predict(X_test)  
# Построение модели 5-й степени  
Y1_predict_5 = PolynomialRegression(5).fit(X, Y1).predict(X_test)  
Y2_predict_5 = PolynomialRegression(5).fit(X, Y2).predict(X_test)
```

Рис. 9. Построение моделей на основе полиномиальной регрессии 3-го, 5-го и 7-го порядков

Для оценивания точности полученных результатов была использована стандартная мера оценки – оценка относительной погрешности (рис. 10, табл. 3)

Таблица 3

**Относительная ошибка вычислений для разных марок стали и различных степеней регрессионного полинома**

С оксидной пленкой							
		2-я степень		3-я степень		5-я степень	
Марка стали	Потенциал истинный	Потенциал расчетный	Ошибка	Потенциал расчетный	Ошибка	Потенциал расчетный	Ошибка
12X18Н10Т	362	439.16	21.3 %	444.95	22.9 %	407.13	12.5 %
Ст3	538	516.09	4.1 %	536.45	0.3 %	564.25	4.9 %
09Г2	502	527.45	5.1 %	527.34	5.1 %	518.94	3.4 %
20Х13	167	157.86	5.5 %	144.38	13.5 %	140.16	16.1 %
10ХСНД	533.67	536.53	0.5 %	531.81	0.3 %	586.27	9.9 %
Без оксидной пленки							
		2-я степень		3-я степень		5-я степень	
Марка стали	Потенциал истинный	Потенциал расчетный	Ошибка	Потенциал расчетный	Ошибка	Потенциал расчетный	Ошибка
12X18Н10Т	520	498.96	4.1 %	508.98	2.1 %	462.01	11.2 %
Ст3	434.33	434.62	0.1 %	434.38	0.1 %	441.69	1.7 %
09Г2	428.33	447.18	4.4 %	441.17	2.9 %	439.96	2.7 %
20Х13	459.00	494.97	7.8 %	506.50	10.3 %	494.11	7.7 %
10ХСНД	446.67	447.55	0.2 %	439.58	16 %	458.44	2.6 %

Как показывает анализ полученных результатов, оптимальным представляется использование различных вычислительных моделей с различными степенями регрессионных полиномов. Так, например, для марки стали 12X18Н10Т наилучшая точность получена с помощью полинома 5-й степени, а для марки Ст3 – с помощью полинома 3-й степени (рис. 11, 12).

```
In [12]: np.concatenate([Y1_predict_2, Y1_predict_3, Y1_predict_5])
Out[12]: array([439.15625, 516.0859375, 527.4453125, 157.85546875,
536.53125, 444.95467213, 536.45467213, 527.33571429,
144.38032787, 531.81032787, 407.13245402, 564.24787515,
518.9355001, 140.15914239, 586.2727591 ])

In [13]: ## Расчет ошибки предсказания модели
# С оксидной пленкой
E_Y1_2 = 100*np.abs((Y1_predict_2 - Y1_test.values) / Y1_test.values)
E_Y1_3 = 100*np.abs((Y1_predict_3 - Y1_test.values) / Y1_test.values)
E_Y1_5 = 100*np.abs((Y1_predict_5 - Y1_test.values) / Y1_test.values)
# Без оксидной пленки
E_Y2_2 = 100*np.abs((Y2_predict_2 - Y2_test.values) / Y2_test.values)
E_Y2_3 = 100*np.abs((Y2_predict_3 - Y2_test.values) / Y2_test.values)
E_Y2_5 = 100*np.abs((Y2_predict_5 - Y2_test.values) / Y2_test.values)
```

Рис. 10. Результаты расчетов и вычисление относительной ошибки

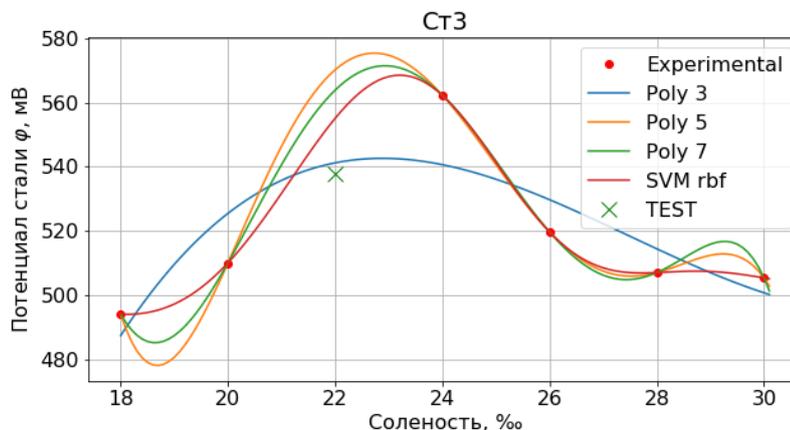


Рис. 11. Результат работы вычислительной модели с различными степенями регрессионных полиномов при прогнозировании потенциала Ст3 с оксидной пленки

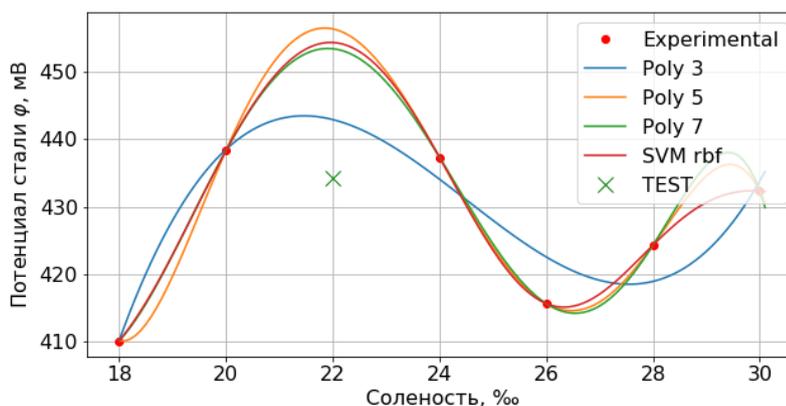


Рис. 12. Результат работы вычислительной модели с различными степенями регрессионных полиномов при прогнозировании потенциала Ст3 без оксидной пленки

Второй подход к построению вычислительных моделей основывался на использовании метода опорных векторов SVM (рис. 13).

```
In [16]: ## Решение с помощью вектора опорных векторов
svr_rbf = SVR(kernel='rbf', C=1000, gamma=0.1, epsilon=.01)
svr_poly = SVR(kernel='poly', C=100, gamma='auto', degree=3, epsilon=.0)
# Построение модели 2-й степени
Y1_predict_svr_rbf = svr_rbf.fit(X, Y1).predict(X_test)
Y2_predict_svr_rbf = svr_rbf.fit(X, Y2).predict(X_test)
Y1_predict_svr_poly = svr_poly.fit(X, Y1).predict(X_test)
Y2_predict_svr_poly = svr_poly.fit(X, Y2).predict(X_test)
# Вычисление ошибки модели
E_Y1_svr_rbf = 100*np.abs((Y1_predict_svr_rbf - Y1_test.values) / Y1_test.values)
E_Y2_svr_rbf = 100*np.abs((Y2_predict_svr_rbf - Y2_test.values) / Y2_test.values)
E_Y1_svr_poly = 100*np.abs((Y1_predict_svr_poly - Y1_test.values) / Y1_test.values)
E_Y2_svr_poly = 100*np.abs((Y2_predict_svr_poly - Y2_test.values) / Y2_test.values)
```

Рис. 13. Построение вычислительной модели  
 на основе метода опорных векторов

При построении вычислительной модели использовались следующие разновидности – с полиномиальной ядерной функцией и ядром в виде радиальной базисной функции. Полученные результаты расчетов представлены в Таблице 4.

Таблица 4

**Относительная ошибка вычислений для разных марок стали и различных ядерных функциях для метода опорных векторов**

С оксидной пленкой					
		polynomial		rbf	
Марка стали	Потенциал истинный	Потенциал расчетный	Ошибка	Потенциал расчетный	Ошибка
12X18H10T	362	438.81	21.2 %	449.37	24.1 %
Ст3	538	518.96	3.5 %	542.56	0.9 %
09Г2	502	540.39	7.6 %	525.85	4.8 %
20Х13	167	132.53	20.6 %	151.17	9.5 %
10ХСНД	533.67	557.86	4.5 %	565.52	5.9 %
Без оксидной пленки					
		polynomial		rbf	
Марка стали	Потенциал истинный	Потенциал расчетный	Ошибка	Потенциал расчетный	Ошибка
12X18H10T	520	505.15	2.8 %	470.65	9.5 %
Ст3	434.33	431.13	0.7 %	458.97	5.7 %
09Г2	428.33	446.18	4.2 %	436.17	1.8 %
20Х13	459.00	522.0	13.7 %	528.59	15.2 %
10ХСНД	446.67	457.47	2.4 %	457.35	2.4 %

По аналогии с полиномиальным методом, результаты с наименьшей точностью соответствуют маркам стали 12X18H10T и 20X13 с оксидной пленкой, в тоже время точность оценки улучшилась для стали марки 09Г2 и Ст3.

**Заключение**

Построена вычислительная модель значений потенциалов различных видов корпусных сталей с оксидной пленкой и без оксидной пленки при различной солености морской воды, применяемых для корпусов морских судов и подводных конструкций океанотехнических сооружений, проектируемых для Черноморского бассейна Севастопольского региона и эксплуатирующихся в этом регионе.

Анализ результатов проведенного исследования показал, что оптимальным представляется использование различных вычислительных моделей с различными степенями регрессионных полиномов для достижения наилучшей точности для различных марок корпусных сталей.

*Благодарности*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-48-920017.

**Список литературы:**

1. Kramar Vadim, Neural Network Modeling the Potential of Steels with Different Chrome Content / Vadim Kramar, Veronika Dushko, Anna Rodkina, Vasiliy Alchakov // Proceedings Engineering of the 26th International DAAAM Symposium «Intelligent Manufacturing & Automation» 21-24th October 2015, Zadar, Croatia, EU, Volume 26, No.1, ISSN 1726-9679, Ed. B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2016. – pp. 1059–1067.
2. Hussein Kadhim Mohammed AL-Shareefi. Neural Network Corrosion Control by Impressed Cathodic Protection / University of Technology – Baghdad – Iraq. 2009.
3. Wasserman, P.D. «Neural Computing :Theory and Practice», Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 1989.
4. Jain, A.K., Mao, J.and Mohiuddin, K. «Artificial Neural Networks: A Tutorial», IEEE Computer, Vol.29, No.3, pp.31-44, 1996.
5. Hornik, K., Stinchcombe, M.and White, H. «Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators», Neural Networks, Vol.2, pp.359 -366, 1989.
6. Principe, J.C., Euliano, N.R.and Lefebvre, W.C. «Neural and Adaptive Systems», John Wiley and Sons, Inc., USA, 2000.
7. Hecht-Nielsen, R. «Neurocomputing», Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1990.
8. Shayma Mehdi Salih, «study the effect of some variables on cathodic protection current density», MSc.Thesis, Iraq University of Technology, 2005.
9. V A Kramar, V V Alchakov, V R Dushko, T V Kramar Application of support vector machine for prediction and classification / IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018) 032070 doi :10.1088/1742-6596/1015/3/032070
10. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
11. Вандер Плас Дж. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение / Плас Дж. Вандер. – СПб.: Питер, 2018. – 576 с.: ил.
12. Родькина А.В. Гибридная нейронная сеть для прогнозирования защитного потенциала подводной части океанотехнических сооружений / А.В. Родькина, В.А. Крамарь, Е.М. Грамузов, О.А. Иванова // Труды Крыловского государственного научного центра. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. – Журнал\_№ 20192. – Том 2. – С. 254–262.

## COMPUTATIONAL MODEL OF HULL STEEL POTENTIAL VALUES IN SEA WATER

**Vasiliy V. Alchakov**

*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

**Vadim A. Kramar**

*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

**Anna V. Rodkina**

*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

*Abstract. The article provides an analysis of existing neural network models. The features of constructing a neural network using several parameters that affect the output value are described. The advantages of using neural networks and computing systems based on them are revealed. The task was solved using the Python programming language. The computing model of the potential values of steel with an oxide film and the potential of steel without an oxide film has been developed for various salinity of sea water and different types of hull steels used for hulls of sea vessels and underwater structures of ocean engineering structures designed for the Black Sea basin of the Sevastopol region and operated in this region. The obtained results will improve the accuracy of predicting potentials for various hull steel grades.*

*Keywords: neural networks, hull steels, sea vessels, ocean engineering structures, potential, layers, weight, thresholds.*

### References:

1. Kramar Vadim, Dushko Veronika, Rodkina Anna, Alchakov Vasilii «Neural Network Modeling the Potential of Steels with Different Chrome Content» Proceedings Engineering of the 26th International DAAAM Symposium «Intelligent Manufacturing & Automation» 21-24th October 2015, Zadar, Croatia, EU, Volume 26, No.1, ISSN 1726-9679, Ed. B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU (2016): 1059–1067.
2. Hussein Kadhim Mohammed AL-Shareefi «Neural Network Corrosion Control by Impressed Cathodic Protection» University of Technology, Baghdad, Iraq (2009).
3. Wasserman P.D. «Neural Computing: Theory and Practice» Van Nostrand Reinhold, New York, USA (1989).
4. Jain A.K., Mao J., Mohiuddin K. «Artificial Neural Networks:A Tutorial» IEEE Computer, Vol. 29, No.3 (1996): 31–44.
5. Hornik K., Stinchcombe M., White H. «Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators» Neural Networks, Vol. 2 (1989): 359–366.
6. Principe J.C., Euliano N.R., Lefebvre W.C. «Neural and Adaptive Systems» John Wiley and Sons, Inc., USA (2000).
7. Hecht-Nielsen R.»Neurocomputing» Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1990).
8. Shayma Mehdi Salih, «Study the effect of some variables on cathodic protection current density» MSc.Thesis, Iraq University of Technology (2005).
9. Kramar V.A., Alchakov V.V., Dushko V.R., Kramar T.V. «Application of support vector machine for prediction and classification» IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018) 032070 doi :10.1088/1742-6596/1015/3/032070
10. Kruglov V.V., Borisov V.V. «Artificial neural networks. Theory and practice» M.: Hot line, Telecom (2002): 382.
11. Vander Place J. «Python for complex tasks: data science and machine learning» SPb.: Peter (2018): 576.
12. Rodkina A.V., Kramar V.A., Gramuzov E.M., Ivanova O.A. «Hybrid neural network for predicting the protective potential of the underwater part of ocean engineering structures» Proceedings of the Krylov State Scientific Center. SPb.: Federal State Unitary Enterprise «Krylov State Scientific Center», Journal\_№ 20192, Volume 2 (2019): 254–262.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Альчаков Василий Викторович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Информатика и управление в технических системах» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
e-mail: alchakov@sevsu.ru

**Крамарь Вадим Александрович**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Информатика и управление в технических системах» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
e-mail: vakramar@sevsu.ru

**Родкина Анна Владимировна**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Океанотехника и кораблестроение» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
e-mail: a.v.rodkina@gmail.com

**Vasilii V. Alchakov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Informatics and Control in Technical Systems, Sevastopol State University,  
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

**Vadim A. Kramar**, D.Sc.(Tech.), Professor of the Department of Informatics and Control in Technical Systems, Sevastopol State University,  
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

**Anna V. Rodkina**, Ph.D. in Engineering Science, Senior Lecturer of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding Sevastopol State University,  
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

Статья поступила в редакцию 18.06.2020 г.

УДК: 656.6

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.94>

## **ТЕПЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛА**

**А.В. Винцов**

*АО «Судостроительный завод «Вымпел», г. Рыбинск, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2614-8575>*

**Е.Г. Бурмистров**

*Волжский государственный университет водного транспорта,*

*г. Нижний Новгород, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0385-0847>*

*Аннотация. В статье описывается состояние листов металла в процессе плазменной резки. Также в тексте приведена исходная зависимость величины деформаций от длины листового металла  $L$ , ширины реза  $H$ , и скорости резки  $v$ . Далее из этой формулы выведена новая зависимость величины деформации от силы тока, напряжения, а также свойств материала. В конце статьи обозначены некоторые способы борьбы с возникающими при плазменной резке тепловыми деформациями листа металла – такие, как устранение напряжённого состояния листов металла, отношение линейных размеров детали к её толщине; рассказано о приёме закрепления листов металла к раскройному столу, уменьшение отходов после резки, влияние скорости резки на тепловые деформации, положение листа в процессе резки и равномерный нагрев листа.*

*Ключевые слова: остаточные деформации, упрочнение металла, напряжённость листа металла, коробление металла, равномерный нагрев, толщина листа, ширина реза.*

### **Введение**

По плазменной резке сделано очень много исследований, но мы всё-таки решили изучить, какой будет зависимость конечных деформаций при резке и как она будет зависеть от основных параметров плазморезательной машины. Для этого мы попытаемся вывести приблизительную зависимость конечных деформаций от параметров станка.

Также для устранения деформаций более развёрнуто рассмотрятся способы борьбы с ними и предложены некоторые решения ситуаций с деформациями, возникающие на производстве.

Рассматриваются типичные случаи, которые могут возникнуть и решения, которые ранее были сделаны в этих ситуациях, но могут быть и другие решения – это уже на усмотрение читателя данной статьи.

### **Основная часть**

При плазменной резке листы металла, как правило, теряют свою устойчивость и детали, полученные в процессе плазменной резки, могут иметь остаточные напряжения, появляющиеся при тепловой обработке металла [1]. Т.к. резка является обратным сварке процессом, то и деформации, которые приобретают детали после этого процесса будут не сжимающие, а, как мы полагаем, растягивающие (рис. 1).

Т.к. кромка обрезана в процессе тепловой обработки и неравномерного нагрева, то она, как правило, может быть ещё и закалена. В связи с этим и возникают не очень значительные деформации, иногда называемые короблением. После начала резки, когда только начинается деформация кромок, происходят небольшие перемещения

листа, т.к. детали отделяются от него. При этом размеры отрезанной детали после резки и после её полного остывания не совпадают с размерами, заданными программой.

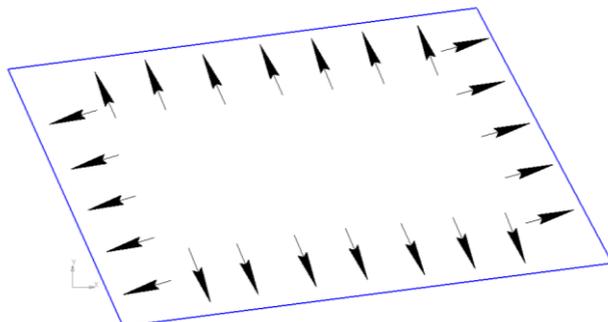


Рис. 1. Растягивающие напряжения после процесса плазменной резки

Величина этих конечных деформаций, полученных при тепловой резке, пропорциональна квадрату длины листового металла и тем больше, чем меньше его ширина и скорость резки при прочих равных условиях, т.е. если деформации, получаемые при резке  $\delta$ , длина листового металла  $L$ , ширина реза  $H$ , скорость резки  $v$ , то пропорциональность имеет вид:

$$\delta \sim L^2 / vH,$$

если скорость заменить по формуле  $v = \ell/t$ , где  $\ell$  – длина реза, а  $t$  – время резки, то будем иметь

$$\delta \sim L^2 t / H \cdot \ell,$$

Пропорциональность более простая, к тому же все параметры известны: их выдаёт машина в картах раскроя. Для получения равенства необходимо ввести некоторый коэффициент.

Примем  $k$  за некоторый коэффициент пропорциональности для получения равенства, тогда

$$\delta = kL^2 t / H \cdot \ell,$$

В процессе плазменной резки происходит несколько фазовых изменений в металле это

- его нагрев до температуры плавления;
- само плавление;
- испарение (последующий выдув металла из реза).

Температура в процессе плазменной резки меняется в довольно широком диапазоне: от нормальных температур до  $\sim 10\text{--}30^\circ\text{C}$  до температуры плавления и испарения металла (Температура кипения железа  $3000^\circ\text{C}$ ). В процессе плазменной резки в следствии этого происходит ряд превращений.

Для определения зависимости конечных деформаций от силы тока и напряжения воспользуемся законом Ома и формулой для определения сопротивления проводника:

$$I = U/R, R = \rho l/S,$$

и сделаем небольшое допущение, а именно рассмотрим лист металла как проводник прямоугольного сечения,

$$l = US/I\rho, U = I\rho l/S,$$

а его длину  $l$  сделаем равной длине реза  $L$ , тогда подставив эти равенства получим  $l = US/Ip$ , и также  $\delta = kL^2t/H \cdot l$ , выражение для зависимости величины конечных деформаций от силы тока и напряжения:

$$\delta = kL^2 I p t / H U S .$$

Если машина вырезает фигурные детали, необходимо учитывать, что тепловые деформации незначительно, но увеличивают ширину реза, так как при вырезании фигурных деталей скорость станка несколько ниже, чем при движении по прямой и для того, чтобы детали точно соответствовали указанным размерам, необходимо учитывать эти незначительные тепловые деформации.

При плазменной резке существует несколько способов борьбы с деформациями, возникающими при тепловой обработке металла:

1. Устранение напряжённого состояния листов металла перед резкой. Для удаления внутренних напряжений, полученных после изготовления листа, обычно применяют термические методы для их устранения.

На графике можно увидеть, что прочность металла интенсивно увеличивается вначале, затем при возрастании деформаций механические свойства увеличиваются незначительно. С возрастанием степени деформации предел текучести меняется быстрее временного сопротивления. С увеличением температуры образовавшихся зёрен становится больше. При повышении температуры нагрева диаметр рекристаллизованных зёрен увеличивается. Первичная рекристаллизация полностью убирает наклёп, полученный пластической деформацией.

Металл становится более ровным, с минимальным количеством дефектов, образованных кристаллическим строением. Свойства металла после рекристаллизации похожи на свойства отожжённого металла.

При удалении внутренней напряжённости от пластических деформаций, происходящих при необратимом перемещении атомов на незначительные расстояния от начальных положений равновесия, изменяется ряд свойств, например, увеличивается прочность и пластичность, а также нейтрализуется влияние концентраторов напряжений.

Упрочнение металла при деформировании показывает кривая Бочвара-Одинга (рис. 2).

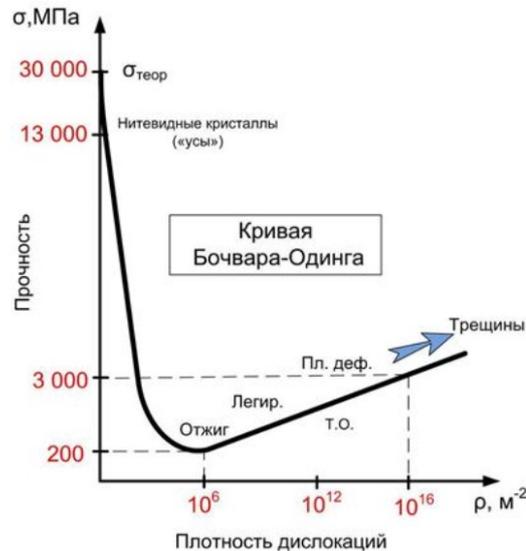


Рис. 2. График зависимости плотности металла от плотности дефектов

Деформация приводит к повышению плотности дислокаций в металле.

Рекристаллизационный отжиг с последующим фазовым переходом металла в несколько другое состояние поможет снять напряжения после холодной пластической деформации.

Температура рекристаллизации будет определяться по формуле:  $T_{рек} = \alpha \cdot T_{пл}$ .

Коэффициент  $\alpha$  будет зависеть от чистоты металла и степени его пластической деформации. При технической чистоте металла  $\alpha$  будет равна 0,3...0,4, но будет снижаться с возрастанием степени деформации. Если уменьшить количество примесей, то  $\alpha$  снизится до 0,1...0,2. В твёрдых растворах  $\alpha$  достигает 0,5...0,6, а в растворенных тугоплавких металлах – 0,7...0,8. Температурный порог рекристаллизации для каждого металла свой, например, для алюминия 100 °С, меди 270 °С, а для относительно чистого технического железа 450 °С. Горячее деформирование обычно производится при температуре немного выше температуры рекристаллизации данного металла, чтобы снять полученный наклёп одновременно проведя рекристаллизацию. Если этого не произойдёт, то наклёп будет частично или полностью сохранен.

Горячая деформация используется для обработки трудно деформируемых, а также мало пластичных металлов и сплавов.

Более качественной является холодная деформация. Она даёт большую точность размеров и улучшает качество поверхности деталей.

Это применяют для листов, не подвергавшихся предварительной термической обработке [2].

2. Отношение линейных размеров детали к её толщине. Чтобы получился более равномерный прогрев деталей, и они были менее подвержены деформациям, выгодно, чтобы отношение линейных размеров к толщине детали было как можно меньшим.

Если принять  $\delta$  – за толщину детали, а  $L$  – за её длину,  $H$  – за ширину, то можно вывести отношение линейных размеров как  $(L+H)/\delta$  или  $L/\delta + H/\delta$ . Нам нужно, чтобы это отношение стремилось к 0,  $\delta$  не может стремиться к 0, т.к. стоит в знаменателе дроби, следовательно,  $L$  и  $H$  должны стремиться к 0.

3. Также применяется приём закрепления листа металла к раскройному столу струбцинами и другими приспособлениями для сохранения его неподвижности. Для фиксации деталей относительно листа применяются технологические приёмы непрерывной резки с разрезанием оставленных перемычек и мостиков после полного остывания листа металла. Чтобы избежать смещения участков от заданной линии реза в них во время обрезки вставляют клинья.

Деформации листа металла и заготовок, полученных из него, будут иметь зависимость от величины внутренних напряжений, возникающих в области около горелки и сильном неравномерном её нагреве относительно всей поверхности листа. Значение величин этих напряжений, имеющих место в металле, будет похоже на сварочные, и будет сочетаться с изменением температурного поля, значением температуры и градиента её изменения в следовании по линии реза и перпендикулярно ей, а также будет зависеть от жёсткости разрезаемого листа стали. Т.к. напряжения, образующиеся в листе металла в процессе резки, в области, находящейся непосредственно возле головки резака, лежат в рамках или превышают предел текучести разрезаемого металла, то даже небольшая пластическая деформация будет давать остаточные деформации и напряжения.

При изготовлении деталей из толстолистовой стали мы будем иметь дело с изгибающими деформациями; а при резке тонколистовой стали также учитывается коробление самой плоскости листа.

Можно перечислить лишь некоторые из причин, по которым не удастся выработать общих мер для устранения деформации металла:

- 1) размеры и форма получаемых деталей весьма различна;
- 2) детали вырезаются по всей плоскости листа;

3) параметры при резке могут значительно отличаться (количество деталей, толщина листа и другие).

В обрабатываемом на станке с ЧПУ листе металла вследствие неравномерного нагрева и охлаждения в процессе резки могут возникать деформации, и он начнёт передвигаться на опорах стола раскроя. Шаблон, по которому вырезают деталь, будет зафиксирован на станке и останется неподвижным. И поэтому размеры готовой детали немного могут отличаться от размеров чертежа. Чертёжные размеры и размеры детали будут похожи, если рабочий направит горелку строго по линии шаблона, независимо от того совпадает она или нет.

Длинные узкие полосы деформируются обычно пропорционально квадрату их длины ( $\sim L^2$ ). Такие полосы лучше отрезать в первую очередь, расположив их у края листа, дабы избежать сильной деформации.

Данные факторы влияют на величину деформации, и обычно учитываются в общих рекомендациях по снижению величины остаточной деформации в процессе газовой резки [3].

4. С уменьшением отходов после резки. Наименьшие деформации можно получить, если резать детали, сопоставимые с площадью заготовки для вырезаемой детали, т. к. при такой обработке наибольшие деформации будут иметь отходы листа, а не вырезанные детали.

При точной вырезке деталей желательно, чтобы у обрезков была большая подвижность, нежели у вырезанной детали. При работе по такой технологии для резки деталей специально готовят не большие листы, а предварительно вырезанные карты – заготовки нужного размера. Если нельзя вырезать деталь из заранее приготовленной карты – заготовки, то используют специально разработанную последовательность резки.

При таком способе первыми режутся стороны деталей, у которых наименьший припуск на механическую обработку, чтобы избежать искажения деталей. Но в производственных условиях не всегда можно это сделать. Из-за этого на практике всегда стараются получить минимальный отход при резке. Также очень гибкий остаток может быть причиной искажения размеров получаемых деталей, поэтому будет удобнее использовать технологию резки при которой часть отходов остаётся замкнутыми, и они не будут свободно деформироваться [4].

При больших масштабах производства даже малая экономия металла на одном изделии даст в итоге большую экономию. Есть несколько способов экономии металла:

- использование наиболее рационального расположения заготовок на листе;
- сокращать количество используемых перемычек;
- увеличивать точность расчётов как для заготовок, так и для припусков на обрезку;
- использовать получаемые отходы для изготовления других деталей;
- убрать брак и снизить нормы потерь времени на отладку установки резки.

Всё это можно достигнуть при использовании установки лазерной резки металла. Но ей необходимо тоже уметь грамотно пользоваться, тому же станок стоит в разы дороже установки плазменной резки.

И в независимости от того, что программа сама подберёт наиболее оптимальные варианты и способ раскроя, оператору всё же необходимо знать основные этапы, возможности их оптимизации и способы экономии для более качественной плазменной резки.

Основной операцией, связанной с вероятными потерями, является раскрой металла на штучные заготовки и полосы. Здесь требуется тщательная разработка раскройных карт. Для крупных заготовок применяют комбинированный раскрой. Узкие полосы режут вдоль листа, при этом уменьшая количество концевых отходов полосы. Но желательно резать широкие полосы, располагая детали соответственным образом.

При этом будет меньшее количество резов и меньшие потери на концевые расходы. Заготовки, которые будут подвергаться гибке, нарезаются с учётом направления волокон проката.

При разрезании штучных заготовок на гильотинных ножницах, зачастую не соблюдаются условия экономного расхода. Но это недопустимо! Поэтому нужно применять специальные устройства, облегчающие настройку и повышающие точность реза [5].

Всё затрудняется, если разрезается лист на разнотипные заготовки. В этом случае применяется метод комбинированного раскроя.

При раскрое листов на крупные полосы учитывают кратность длины полосы размерам вырезаемой детали. Это позволит использовать некратный остаток на резку полос для других деталей. В целях экономии металла листы раскладывают по разным картам раскроя. Их используют при групповом раскрое, когда из одного листа нужно получить различные детали, и при индивидуальном раскрое, когда необходимо получить несколько одинаковых деталей.

Более рациональное использование металла будет при размещении на одном листе заготовок различных габаритов, когда вначале размещают наиболее крупные заготовки, затем заготовки, потом заготовки средних размеров, и в конце, всё свободное место листа заполняют маленькими заготовками.

От того, как разложены детали на листе металла, зависит коэффициент использования материала.

При экономии листа раскраиваемого металла, также необходимо учитывать возможности технологического и организационного порядка, т.е. при разных способах размещения заготовок на листе, нужно выбирать тот, при котором будет удобнее реализовать имеющиеся на предприятии инструменты.

При таком способе не только минимизируются отходы, но и повышается производительность труда [6].

5. Скорость резки. Очень сильно на тепловые деформации влияет скорость резки. При возрастании скорости снижается количество теплоты, подводимое при резке к единице длины реза, что способствует уменьшению искажения деталей.

Скорость резки также зависит от интенсивности выплавления металла. При толщине подаваемого металла до 25 мм, быстрота операций плазменной резки выше, чем скорость других способов обработки металла (например, кислородно – газовой резки) почти в 2 раза. При уменьшении толщины материала преимущество плазменной резки возрастает ещё больше. Сквозной прожиг металла с помощью плазменной резки осуществляется за секунды, в то время как устройствам кислородно – газовой резки необходимо предварительно нагреть металл, что увеличивает время выполнения этой операции в десятки раз. Ещё следует учесть, что плазмотроны используются в основном на станках с ЧПУ. Это положительно сказывается как на скорости, так и на качестве резки [7].

Скорость перемещения резака определяет качество реза. От неё зависит присутствие шлака под листом и над ним, а также сложность его удаления. Если скорость мала, то возникает перерасход плазмообразующего газа. На нижней части листа появится легко удаляемый «низкоростный» шлак.

При большой скорости перемещения сопла линия реза становится волнистой. На нижней же части листа будет присутствовать плохо отделимый «высокоростный» шлак. Идеальной скоростью резки листового металла считается перемещение резака, при котором угол отставания между прорезанием верхней и нижней кромок металла не превышает 5 градусов [8].

6. Положение листа в процессе резки. Необходимо следить за тем, чтобы разрезаемый лист не провисал под действием местного нагрева. Поэтому желательно наличие большого числа рёбер жёсткости на плазморезательной машине.

Внутренние напряжения, которые имеются в листе проката, искажают контуры реза. Они устраняются путём резки по внутреннему контуру.

Поверхность разрезаемого металла должна быть чистой и расположенной горизонтально. При соблюдении данных условий точность размеров вырезаемой детали и качество поверхности реза будут наилучшими. Именно потому стальные листы перед резкой подвергаются правке и очистке на дробеструйной установке.

Правка листов выполняется механическим способом: прокаткой на многовалковых листопрямительных вальцах, растяжением на растяжных правильных машинах. Проверку правленных листов производят измерением стрелы прогиба прямолинейной стальной рейкой; между рейкой и листом в местах прогиба должен быть виден просвет. Стрела прогиба не должна превышать 3 мм на 1 м длины, иначе искажение вырезаемых деталей будет значимым [9].

7. Равномерный нагрев может значительно уменьшить внутренние напряжения. При прямолинейной линии реза следует применять направление резки от середины к краям разрезаемого листа, детали сложной конфигурации вырезаются отдельными участками, при этом желательно, чтобы они были расположены друг напротив друга; вырезать детали обратным ступенчатым методом и т.д. [10].

Для достижения равномерного нагрева применяется одновременная резка несколькими резаками. Для избегания сильного искажения фигур простейшей формы (например, при вырезке полос), целесообразна одновременная резка двумя резаками, расположенными на необходимую ширину полосы или заготовки. В этом случае флюс подается отдельно от флюсопитателя.

Одно из свойств металла – изменение размера под воздействием температуры. При действии высокой температуры металл расширяется. Как он расширится зависит от температуры и коэффициента линейного расширения этого металла [11].

### **Заключение**

В статье авторами рассматривается множество вопросов, которые могут пригодиться не только людям, работающим на производстве, но и связанным только с теоретическими вопросами касательно плазменной резки.

Для лучшего понимания процесса плазменной резки и процессов, описываемых непосредственно в статье, авторы рекомендуют предварительно ознакомиться с соответствующей литературой.

В статье был выполнен вывод основной зависимости конечных деформаций, получаемых при плазменной резке, от таких параметров, как сила тока напряжение, длина и ширина реза и т.д. В полученной формуле все параметры являются известными перед резкой, либо после неё, при этом рассчитывать ничего не надо.

Относительно других вопросов, решаемых в статье можно сказать, что варианты, предложенные авторами, были найдены в изученной литературе.

Решения приводятся на усмотрение авторов, но могут быть и другие, не рассмотренные, либо неизвестные решения.

### **Список литературы:**

1. Michelle Avila «How metal fabricators can achieve plasma cut edge perfection» [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/plasmacutting/how-metal-fabricators-can-achieve-plasma-cut-edge-perfection>
2. Влияние холодной пластической деформации на структуру и свойства металлов. Материаловедение. Теория 24.12.2016 г. Вопросы по теории на тему «Влияние холодной пластической деформации и последующего отжига на структуру и свойства металлов» по предмету материаловедение в МГТУ им. Баумана. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://otvetto.ru/notes/4329>

3. Деформации при резке. Резка листовых закаливающихся сталей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [https://yandex.ru/turbo?text=https %3A%2F%2Fstudopedia.su%2F2\\_24799\\_ deformatsii-pri-rezke.html&lite=1](https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fstudopedia.su%2F2_24799_deformatsii-pri-rezke.html&lite=1)
4. Методы экономии при плазменной резке. Экономим материал, снижаем себестоимость, увеличиваем прибыль. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [www.plasmarezka.ru/plazmennaya-rezka-metalla/34-econom-plasma-rezka](http://www.plasmarezka.ru/plazmennaya-rezka-metalla/34-econom-plasma-rezka)
5. Плазменная резка и факторы, влияющие на её технологичность. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [pp-progress.ru/articles/plasmennaya-rezka--i-factory-vliyayushhie-na-e-tehnologichnost](http://pp-progress.ru/articles/plasmennaya-rezka--i-factory-vliyayushhie-na-e-tehnologichnost)
6. Tech-tips-for-better-plasma-cutting [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/tech-tips-for-better-plasma-cutting>
7. Параметры плазменной резки. Тепловентмаш. Режим доступа <https://plasma-standok.ru/parametry-plazmennoy-rezki/>
8. §61. Техника резки. Металлургия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [metallurg.ru/books/item/f00/s00/z0000015/st063.shtml](http://metallurg.ru/books/item/f00/s00/z0000015/st063.shtml)
9. Erbilin M.I., Sakir O.I. Effects of process parameters in plasma arc cutting on stainless steels and structural steel. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://stumejournals.com/journals/mtm/2019/1/23/pdf>
10. Причины возникновения напряжений и деформаций. Онлайн справочник о сварке. osvarke.net. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [osvarke.net/deformacii/prichiny-vozniknoveniya-napryazhenij-i-deformacij/](http://osvarke.net/deformacii/prichiny-vozniknoveniya-napryazhenij-i-deformacij/)
11. Distortion control of cutting piece in CNC plasma cutting machine [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://huawei-cutting.com/distortion-control-of-cutting-piece-in-cnc-plasma-cutting-machine-276.html>

## THERMAL DEFORMATION AND THE LOSS OF STABILITY DURING PLASMA CUTTING OF METAL

**Anna N. Vintsiv**

*JSC Ship yard «Vympel», (JSC SY «Vympel»), Rybinsk, Russia*

**Evgeny G. Burmistrov**

*Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The article deals with the condition of metal sheets in plasma cutting process. The initial dependence of the deformation value on the length of the sheet metal  $L$ , the cutting width  $H$ , and the cutting speed is described. Furthermore, a new dependence of the strain value on the current, voltage, and material properties is derived from this formula. At the end of the article some ways of dealing with thermal deformations of a metal sheet that occur during plasma cutting are shown such as eliminating the stress state of metal sheets, the ratio of the linear dimensions of the part to its thickness. The technique of fixing metal sheets to the cutting table, reducing waste after cutting, the effect of cutting speed on thermal deformations, the position of the sheet during cutting and uniform heating of the sheet are described.*

*Keywords: permanent deformation, hardening of metal, tension of metal sheet, distortion, uniform heating, sheet thickness, cutting width.*

### References:

1. Michelle Avila «How metal fabricators can achieve plasma cut edge perfection» [Electronic resource]. – Access mode <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/plasmacutting/how-metal-fabricators-can-achieve-plasma-cut-edge-perfection>
2. Vliyaniye holodnoj plasticheskoj deformacii na strukturu i svoystva metallov. Materialovedenie. Teoriya 24.12.2016 g. Voprosy po teorii na temu «Vliyaniye holodnoj plasticheskoj deformacii i posleduyushchego otzhiga na strukturu i svoystva metallov» po predmetu materialovedenie v MGTU im. Baumana. [Electronic resource]. – Access mode <https://otvetto.ru/notes/4329>
3. Deformacii pri rezke. Rezka listovyh zakalivayushchihsyah stalej. [Electronic resource]. – Access mode

[https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fstudopedia.su%2F2\\_24799\\_deformatsii-pri-rezke.Html&lite=1](https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fstudopedia.su%2F2_24799_deformatsii-pri-rezke.Html&lite=1)

4. Metody ekonomii pri plazmennoj rezke. Ekonomim material, snizhaem sebestoimost', uvelichivaem pribyl'. [Electronic resource]. – Access mode [www.plasmarezka.ru/plazmennaya-rezka-metalla/34-econom-plasma-rezka](http://www.plasmarezka.ru/plazmennaya-rezka-metalla/34-econom-plasma-rezka)

5. Plazmennaya rezka i factory, vliyayushchie na eyo tekhnologichnost'. [Electronic resource]. – Access mode [pp-progress.ru/articles/plazmennaya-rezka--i-factory-vliyayushhie-na-ee-tehnologichnost](http://pp-progress.ru/articles/plazmennaya-rezka--i-factory-vliyayushhie-na-ee-tehnologichnost)

6. Tech-tips-for-better-plasma-cutting [Electronic resource]. – Access mode <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/tech-tips-for-better-plasma-cutting>

7. Parametry plazmennoj rezki. Teploventmash. [Electronic resource]. – Access mode <https://plasma-stanok.ru/parametry-plazmennoj-rezki/>

8. §61. Teknika rezki. Metallurgiya. [Electronic resource]. – Access mode [metallurgu.ru/books/item/f00/s00/z0000015/st063.shtml](http://metallurgu.ru/books/item/f00/s00/z0000015/st063.shtml)

9. Erbilin M.I., Cakir O.I. Effects of process parameters in plasma arc cutting on stainless steels and structural steel. [Electronic resource]. – Access mode <https://stumejournals.com/journals/mtm/2019/1/23/pdf>

10. Prichiny vozniknoveniya napryazhenij i deformatsij. Onlajn spravocnik o svarke. osvarke.net. [Electronic resource]. – Access mode [osvarke.net/deformatsii/prichiny-vozniknoveniya-napryazhenij-i-deformatsij/](http://osvarke.net/deformatsii/prichiny-vozniknoveniya-napryazhenij-i-deformatsij/)

11. Distortion control of cutting piece in CNC plasma cutting machine [Electronic resource]. – Access mode <https://huawei-cutting.com/distortion-control-of-cutting-piece-in-cnc-plasma-cutting-machine-276.html>

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Винцов Анна Николаевна**, инженер – конструктор, Сектор плазово-технологической подготовки, АО «Судостроительный завод «Вымпел», (АО ССЗ «Вымпел»), Россия, г. Рыбинск, ул. Новая, 4  
a.n.vintsiv@vypmel-rybinsk.ru

**Anna N. Vintsiv**, engineer-constructor, Sector of plazo-technological training, JSC Ship yard «Vypmel», (JSC SY «Vypmel»), 4, Novaya str., Rybinsk, Russia,

**Бурмистров Евгений Геннадьевич**, профессор, д.т.н., кафедра ПиТПС, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: burmistrov\_e\_g@mail.ru

**Evgeny G. Burmistrov**, professor, d.t.s., faculty Ship Design and construction technologies, Federal state budgetary educational university of higher education «Volga state University of water transport», 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, Russia, 603951  
e-mail: burmistrov\_e\_g@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04.06.2020 г.

УДК 629.5.081.326.012/.015.4

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.95>

## ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕКОТОРЫХ ГРУЗОВЫХ СУДОВ В ОНЕЖСКОМ И ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРАХ БЕЗ ЛЮКОВЫХ ЗАКРЫТИЙ

**С.Н. Гирин**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация. Излагаются требования Правил Российского Речного Регистра об оснащении грузовых судов всех классов, эксплуатирующихся в бассейнах Онежского и Ладожского озер, люковыми закрытиями грузовых трюмов. Используется предусмотренная Правилами Речного Регистра возможность изъятия требований путем доказательства равной безопасности эксплуатации судов рассматриваемых проектов с люковыми закрытиями и без них. Рассматриваются баржи проектов 461Г, Р85, 81060, предназначенные для погрузки сыпучих грузов гидроналивом и не имеющие люковых закрытий грузовых трюмов. Для доказательства возможности их эксплуатации в указанных бассейнах без люковых закрытий используются результаты модельных испытаний судов в опытовом бассейне, а также теоретических расчетов общей прочности и аварийной остойчивости. Полученные результаты могут быть использованы судоходными компаниями, имеющими суда данных проектов.*

*Ключевые слова: бункерные суда, гидроналив, Правила Российского Речного Регистра, непотопляемость, общая прочность, испытания моделей, теоретические расчеты.*

### Введение

В последнем издании Правил Российского Речного Регистра [1] в ч. 0 «Классификация» появился п. 6.3.1, который гласит: «Самоходные и несамоходные сухогрузные суда внутреннего плавания всех классов, допускаемые к эксплуатации в Ладожском и Онежском озерах, должны быть оборудованы люковыми закрытиями, требования к которым изложены в 5.6 ч. II Правил».

В прежних изданиях Правил Речного Регистра требование оснащения грузовых судов люковыми закрытиями распространялось на суда класса «М» и суда более высоких классов. Вместе с тем следует отметить, что ранее Правила Речного Регистра относили Онежское и Ладожское озера к бассейнам разряда «М». Действующие Правила позволяют эксплуатировать в указанных озерах суда класса «О» на некоторых трассах с определенными ограничениями.

Допуск судов класса «О» к эксплуатации в Онежском и Ладожском озерах связано, в определенной мере, с улучшением качества метеопрогнозов, однако на сегодняшний день пока рано говорить о 100% оправдываемости прогнозов, поэтому понятна озабоченность Главного Управления Российского Речного Регистра безопасностью эксплуатации открытых судов в бассейнах, в которых высота волны может достигать значительных размеров.

В соответствии с указанным пунктом Главным управлением РРР предписано судовладельцам установить люковые закрытия на комингсах грузовых люков всех судов, эксплуатация которых планируется в Онежском и Ладожском озерах, включая баржи проектов: 461Г(А), 461Г, Р-85А, 81060. Баржи указанных проектов предусматривают возможность погрузки песчано-гравийных смесей (ПГС) гидроналивом. При таком способе погрузка осуществляется до полного заполнения грузового трюма по верх комингса. Очевидно, что в этом случае дальнейшее попадание воды в грузовой трюм невозможно. Вместе с тем, эти суда используются и для перевозки крупно-

фракционного щебня горками. В этом случае в процессе транспортировки в грузовой трюм может попасть вода при забрызгивании на волнении или при сильном ливне.

Как известно, Российский Речной Регистр допускает отступления от требований Правил, если ему будут представлены доказательства равной безопасности эксплуатации поднадзорных объектов, спроектированных по Правилам и с отступлениями от Правил. В частности, п.1.6 ч.0 «Классификация» ПКПС гласит: «При наличии в технической документации замен, равноценных требованиям Правил, организация, являющаяся разработчиком технической документации, представляет Речному Регистру их перечень с изложением их содержания и технических обоснований».

Таким образом, целью настоящей работы является обоснование возможности эксплуатации перечисленных барж в бассейнах Ладожского и Онежского озер без люковых закрытий грузового бункера.

### 1. Особенности конструкции рассматриваемых барж

Схема общего расположения одной из рассматриваемых барж показана на рис. 1, заимствованном из справочника по серийным транспортным судам, в котором также записано, что эти суда «..предназначены для перевозки песка, перегружаемого средствами гидромеханизации, а также других сыпучих минерально-строительных материалов, перегружаемых кранами и другими средствами». Таким образом, эти суда не являются сухогрузными судами. По определению, представленному в Правилах [1]: «Сухогрузное судно – судно, предназначенное для перевозки различных сухих грузов (генеральных грузов, контейнеров, леса, грузов насыпью, автомобилей без людей и т.п.)», поэтому, строго говоря, на них не должно распространяться требование п.6.3.1 ч.0 «Классификация» [1].



Рис. 1. Схема общего вида баржи пр.461Г

Основные характеристики корпусов рассматриваемых судов, представляющие интерес для настоящего исследования, представлены в табл. 1.

Из таблицы следует, что объемы грузовых бункеров барж рассчитаны на погрузку гидроналивом песка до полной грузоподъемности. Плотность мокрого песка составляет примерно 2,0 т/м<sup>3</sup>. Вместимость бункера барж пр. 461Г составляет 1500 м<sup>3</sup>, следовательно, бункер вмещает 3000 т мокрого песка, что соответствует грузоподъемности баржи. Аналогично – для остальных проектов.

Таким образом, при перевозке мокрого песка попадание воды в грузовой трюм при отсутствии люковых закрытий грузового бункера не изменяет посадки судна, предусмотренной проектом, т.е. судно сохраняет осадку, соответствующую полной грузоподъемности.

Таблица 1

**Характеристики корпуса рассматриваемых барж**

Характеристика	Номер проекта баржи		
	461Г	P85	81060
Длина расчетная, м	84,6	86,7	107
Ширина расчетная, м	14,0	14,0	14
Высота борта, м	4,5	3,5	4,5
Высота надводного борта, м	1,3	0,82	0,75
Грузоподъемность, т	3000	2500	4500
Осадка при заданной грузоподъемности, м	3,22	2,68	3,75
Грузоподъемность на 1 см осадки	11,2	11,95	14,9
Вместимость грузового бункера, м <sup>3</sup>	1500	1280	2285
Размеры бункера в плане по верху комингса, м	70,2×7,35	73,2×8,2	87,8×8,2
Размеры бункера в плане по днищу, м	65,4×4,53	70,2×2,3	87,8×4,5

Погрузка минерально-строительных грузов кранами осуществляется, преимущественно, горками. Значения удельных погрузочных объемов некоторых фракций щебня и гранита приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Удельные погрузочные объемы**

Вид груза	Удельный погрузочный объем, м <sup>3</sup> /т
Щебень 5×20	0,57
Щебень 20×40	0,60
Щебень 20×40	0,65
Щебень 70×240	0,71
Отсев гранитный	0,55

Наиболее опасной с позиций непотопляемости и общей продольной прочности является перевозка крупно-фракционного щебня с удельным погрузочным объемом 0,71 м<sup>3</sup>/т и плотностью 1,4 т/м<sup>3</sup>. В этом случае в грузовом бункере размещается часть груза, остальная часть располагается над бункером в виде конусной горки.

В бункере баржи пр.461Г разместится  $1500 \times 1,4 = 2100$  т груза; 900 т располагается в конусных частях горок над бункером. Одна тонна щебня занимает 0,71 м<sup>3</sup> грузового бункера. Плотность гранита составляет 2,6–2,8 т/м<sup>3</sup>, следовательно, одна тонна цельного гранита занимает 0,36 м<sup>3</sup>. Таким образом, в одной тонне щебня с удельным погрузочным объемом 0,71 м<sup>3</sup>/т имеется 0,35 м<sup>3</sup> воздуха. При забрызгивании трюма на волнении это пространство заполнится водой, т.е. в трюм будет принято дополнительно  $0,35 \times 2100 = 735$  т воды. В соответствии с табл. 1 грузоподъемность на 1 см осадки в районе грузовой ватерлинии составляет 11,2 т, следовательно, дополнитель-

ная осадка с принятой водой составит  $735/11,2 = 65,6$  см. При этом высота надводного борта составит  $130 - 65,6 = 64,4$  см.

В бункере баржи пр. Р85А размещается  $1280 \times 1,4 = 1792$  т груза (708 т располагается в конусных частях горок над бункером). Масса воды, попадаемой в грузовой бункер на волнении, может достигать величины  $1792 \times 0,35 = 627$  т. Дополнительная осадка составит  $627/11,95 = 52,5$  см. Высота надводного борта равна  $82 - 52,5 = 29,5$  см.

В бункере баржи пр.81060 размещается  $2285 \times 1,4 = 3199$  т груза (1301 т располагается в конусных частях горок над бункером). Масса воды, которая может попасть в бункер на волнении, составляет  $3199 \times 0,35 = 1120$  т. Дополнительная осадка составит  $1120/14,9 = 75$  см. Высота надводного борта будет равна  $75 - 75 = 0$  см.

Таким образом, во всех случаях остается некоторый запас надводного борта и, следовательно, запас водоизмещения, т.е. баржи остаются на плаву при самом неблагоприятном нагружении.

## 2. Испытания моделей барж в опытовом бассейне

Для исследования поведения судов на волнении были проведены испытания моделей в опытовом бассейне ВГУВТ.

Были изготовлены модели барж пр.461Г и Р-85А в масштабе 1:50. Принят наиболее жесткий характер нагружения модели стальными грузами до необходимой осадки. Волнение создавалось с помощью волнопродуктора. Размеры волны можно было наблюдать на мерной шкале стенки бассейна (рис. 2). Ординаты волны измерялись с помощью поплавка и фиксировались в памяти компьютера (рис. 3).

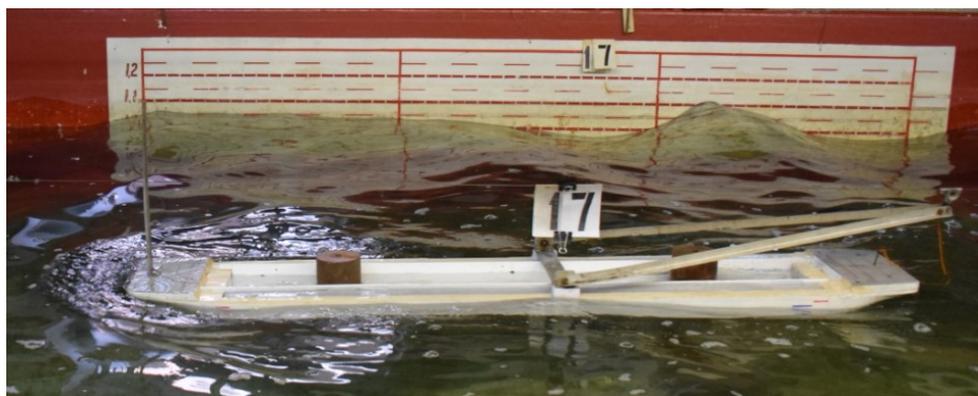


Рис. 2. Положение модели на волнении

В процессе испытаний осуществлялись фото- и видеозаписи. При движении модели баржи пр.461Г на волнении с максимальной высотой до 40 мм, что соответствует реальной волне высотой до 2,0 м попадание воды в бункер либо не наблюдалось, либо было в пределах 0,1 л за время пробега. При максимальной волне, находящейся в пределах 40–54 мм, что соответствует реальной волне 2,0–2,7 м наблюдалось умеренное попадание воды до 1,5 л за время пробега. При высоте волны более 54 мм (2,7 м реальной волны) наблюдалось интенсивное заливание трюма водой, однако при полном заполнении трюма баржа оставалась на плаву даже при большей интенсивности волнения.

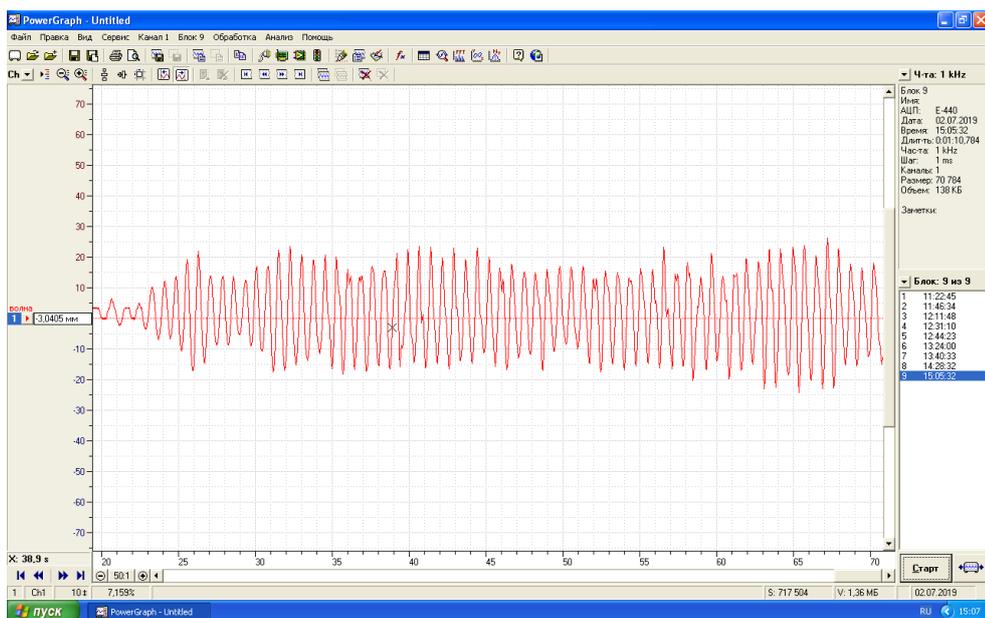


Рис. 3. Пример записи волнового процесса

При полной грузоподъемности, смоделированной стальными грузами, и полном заполнении грузового бункера водой баржа пр.461Г остается устойчивой даже при углах крена, превышающих 45 градусов, когда один из бортов полностью выходит из воды. Баржа не теряет устойчивости при положении лагом к волне при волнении более 54 мм (рис. 4).



Рис. 4. Проверка устойчивости модели в положении «лагом к волне»

Таким образом, испытания модели баржи пр.461Г показали, что она остается на плаву при полной грузоподъемности, смоделированной стальными грузами, с заполненным водой грузовым бункером, при этом сохраняется устойчивость на волнении высотой волны, значительно превышающей 40 мм (2,0 м реальной волны) даже при наиболее неблагоприятном положении лагом к волне.

Баржа пр. Р-85А имеет меньший по сравнению с пр.461Г запас надводного борта и у нее отсутствуют бак и ют, однако, она имеет несколько большую высоту комингсов грузового бункера. Суммарные значения высоты комингса и запаса надводного

борта у этих барж примерно одинаковы. Вместе с тем, отсутствие бака и юта значительно ухудшают ее поведение на волнении по сравнению с баржей пр.461Г.

При высотах волн до 40 мм наблюдалась умеренная заливаемость грузового бункера в пределах 1,5 л за один пробег. Это соответствует примерно 190 т воды на 2,5 км пути, т.е. за 0,5 часа движения на волнении. При высотах волн, превышающих 40 мм, грузовой бункер полностью заливается за один пробег в опытовом бассейне.

При полной грузоподъемности модели, смоделированной стальными грузами, и залитом водой грузовом бункере модель остается на плаву. Остойчивость модели также обеспечена при статическом наклонении на угол до 40 градусов, а также при нахождении модели лагом к волне. При загрузке модели песком остойчивость ее улучшается. Остойчивость сохраняется даже при таком наклонении ее, когда один из бортов полностью выходит из воды.

### **3. Оценка возможного режима волнения на трассах в южной части Ладожского озера и западно-южной части Онежского озера<sup>1</sup>**

По информации, предоставленной судовладельцем, наиболее протяженными трассами эксплуатации перечисленных барж являются:

- в Ладожском озере – переход от устья р. Свирица до п. Шлиссельбург, протяженность которого составляет 120 км;
- в Онежском озере – переход от Уйской губы до устья р. Вытегра, протяженность которого составляет 128 км.

Рассматриваемая трасса в Ладожском озере квалифицируется в [1], как внутренние водные пути разряда «О» в период с мая по сентябрь включительно, в который суда класса «О 2,0» допускаются к плаванию с ограничением по волнению  $h_{3\%} \leq 1,5$  м ( $h_{1\%} \leq 1,73$  м), а в Онежском озере на рассматриваемой трассе суда класса «О 2,0» допускаются к плаванию без дополнительных ограничений.

В процессе эксплуатации возможна ситуация, когда судно будет вынуждено уйти с трассы в ближайшее место убежища из-за реализации опасной ошибки в благоприятном прогнозе волнения. В этом случае судно может начать уход в место убежища с произвольной точки трассы. Наиболее неблагоприятным является принятие решения об уходе в место убежища с точки трассы, характеризующейся наибольшим удалением от места убежища. При выполнении оценки максимально возможного волнения при уходе с трассы в место убежища максимальное удаление от места убежища принято равным 60 км (переход в Ладожском озере от п. Шлиссельбург до устья р. Свирь), так как на несколько более протяженной трассе в Онежском озере (Уйская губа – устье р. Вытегра) есть возможность укрытия в промежуточном месте убежища (п. Вознесенье, исток р. Свирь).

По информации, предоставленной судовладельцем, время прохождения любой из рассматриваемых трасс в условиях волнения не превышает 13 часов. С учетом отмеченного, максимальное время ухода с трассы в ближайшее место убежища составляет 6,5 часов. Однако вероятность ухода с наиболее удаленной точки трассы при неоправданном благоприятном прогнозе волнения достаточно мала. Полагается, что принятие судоводителем решения о прекращении движения по трассе и уходе в ближайшее место убежища возможно с равной вероятностью с любой точки трассы. В связи с отмеченным, оценка максимального режима волнения, на которое может попасть судно в экстремальной ситуации (реализация опасной ошибки в благоприятном прогнозе волнении) оценивалась при расчетном времени ухода в место убежища, равном 6,5 часов (максимально возможно удаление от места убежища при движении по рассматриваемой трассе), а также при движении до места убежища в течение 4-х и 2-х часов (уход в место убежища с промежуточных точек трассы, отстоящих от места убежища на меньшее расстояние).

---

<sup>1</sup> Использованы результаты, полученные к.т.н. Ю.И. Ефименковым

В относительно современных исследованиях [2–4] не приводятся данные по долгосрочным распределениям вероятностей скоростей ветра. Такие данные содержатся лишь в работе [5], изданной достаточно давно (1966 г.) и построенной на обобщении результатов наблюдений за 1957–1963 годы. По данным [5] скорость ветра  $w^*$ , определяемая как скорость ветра, полученная осреднением данных наблюдения за 10 минут на высоте 10 метров и имеющая обеспеченность (вероятность превышения) 5%, в рассматриваемый в [5] навигационный период составляет:

- для южной части Ладожского озера (данные наблюдения по маяку Сухо) –  $w^* \approx 14,6$  м/с;
- для юго-западной части Онежского озера (данные по п. Вознесенье) –  $w^* \approx 17,8$  м/с.

При этом отмечается, что скорость ветра  $w^*$  традиционно принималась в качестве расчетной в работах АО «ЦНИИМФ» и ЦРП РРР по классификации прибрежных морских районов и разработке требований к волновым общим и местным волновым нагрузкам судов смешанного плавания с классом РРР.

Следует отметить, что приведенные выше данные по  $w^*$  имеют значительную тенденцию к завышению по следующим причинам. Рассмотренный в [5] физический период навигации значительно выходит за сезон май–сентябрь, рассматриваемый в настоящей работе. Возможность развития экстремального волнения на рассматриваемых трассах в южной части Ладожского озера и юго-западной части Онежского озера во многом зависит от направления развития волнения (действия ветра). При направлении развития волнения с южных направлений на переходе от п. Шлиссельбург до устья реки Свирица в Ладожском озере возможность развития волнения будет ограничена достаточно умеренными глубинами и ограниченными разгонами волн. Аналогично, по тем же причинам, возможность развития волнения на переходе в Онежском озере от Уйской губы до устья р. Вытегра будет ограничена при развитии с западных направлений.

С учетом достаточно устаревших данных по долгосрочным характеристикам ветра на рассматриваемых трассах в Ладожском и Онежском озерах в работе [6] было предложено ориентироваться на расчетные скорости ветра, регламентируемые [7] при проверке остойчивости судов класса «О» по основному критерию. Так, в соответствии с [7], для судов 461Г; 461Г(А); Р-85А; 8106 класса «О 2,0» предельное ограничение скорости ветра в порыве принимается равной 21 м/с. Однако для оценки динамики развития волнения в существующие расчетные зависимости, приведенные, например, в [8], ориентированы на скорости ветра, полученные осреднением за 10 мин. на высоте 10 м/с. Согласно методике пересчета, приведенной в [9], осредненная за 10 мин. скорость ветра, при регламентированной скорости в порыве 21 м/с составит 17,3 м/с.

Для оценки развития возможного волнения использована зависимость, приведенная в [8]. При этом учитывалось ограничение, обусловленное установившимся волнением, определяемым по следующей зависимости:

$$\frac{g\bar{h}}{w^2} = 0,16 \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{1 + 6 \cdot 10^{-3} (\tilde{x})^{0,5}} \right]^2 \right\} \times th \left\{ \frac{0,625 \left( \frac{gH}{w^2} \right)^{0,8}}{1 - \left[ \frac{1}{1 + 6 \cdot 10^{-3} (\tilde{x})^{0,5}} \right]^2} \right\}, \quad (3.1)$$

где  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $\tilde{x} = \frac{gX}{w^2}$ ;  $H$  – глубина акватории.

Результаты расчета максимального режима волнения при различном времени ухода судна с трассы в место убежища, а также при различных скоростях ветра представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Оценка максимально возможно режима волнения  $h_{3\%}^{\max}$ ,  
на которое может попасть буксируемое судно при уходе в место убежища**

Расчетное время ухода с трассы, часы	Расчетная скорость ветра, м/с	Максимальный режим волнения $h_{3\%}^{\max}$ , м
6.5	17,6	4,64
	14,6	3,45
	12,0	2,83
4.0	17,6	3,78
	14,6	2,82
	12,0	2,07
2.0	17,6	2,83
	14,6	2,10
	12,0	1,54

Для судов, допускаемых к эксплуатации с достаточно жесткими погодными ограничениями, возможность попадания на экстремальные режимы волнения определяются, в первую очередь, надежностью прогнозов волнения. Имеющиеся сведения по надежности прогнозов волнения были обобщены, в частности, ранее в работе АО «ЦНИИМФ» [10]. В этой работе, также и в ранее практических работах по классификации прибрежных морских района для судов с классом PPP, предлагалось использовать для описания условной плотности распределения вероятностей реализации фактических режимов волнения  $h_{3\%}$  при фиксированной прогнозной высоте волны  $h_{3\%}^{\text{пр}}$  закон Релея, записываемый в виде:

$$Q(h_{3\%} | h_{3\%}^{\text{пр}}) = \exp(-(h_{3\%})^2 / E), \quad (3.2)$$

где  $E$  – второй начальный момент распределения.

Результаты ранее проведенных в ЛИВТе и АО «ИЦС» (НПО «Судостроение») исследований позволили определить параметр  $E$ , как функцию от режимной характеристики волнения  $h_{3\%}^{5\%}$  и прогнозируемой высоты волны  $h_{3\%}^{\text{пр}}$ .

Применительно к рассматриваемым условиям эксплуатации судов класса «О2,0» в прибрежных районах южной части Ладожского и Онежского озера принимается  $h_{3\%}^{5\%} \approx 2,0$  м. При этом рассматриваются следующие погодные ограничения:

$$h_{3\%}^{\text{пр}} = 1,75 \text{ м} \quad (h_{1\%}^{\text{пр}} = 2,0 \text{ м}) - E^{0,5}/h_{3\%}^{\text{пр}} = 0,8, \quad E^{0,5} = 1,4 \text{ м}, \quad E = 1,960 \text{ м}^2;$$

$$h_{3\%}^{\text{пр}} = 1,5 \text{ м} - E^{0,5}/h_{3\%}^{\text{пр}} = 0,85, \quad E^{0,5} = 1,275 \text{ м}, \quad E = 1,626 \text{ м}^2;$$

$$h_{3\%}^{\text{пр}} = 1,25 \text{ м} - E^{0,5}/h_{3\%}^{\text{пр}} = 0,9, \quad E^{0,5} = 1,125 \text{ м}, \quad E = 1,266 \text{ м}^2.$$

Вероятности реализации фактических режимов волнения  $h_{3\%}$  при различных прогнозируемых высотах волн  $h_{3\%}^{\text{пр}}$  и режимной характеристики волнения  $h_{3\%}^{5\%} \approx 2,0$  м. представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Оценка вероятностей реализации фактических режимов волнения  $h_{3\%}$  при различных прогнозируемых высотах волн  $h_{3\%}^{np}$  на рассматриваемых трассах в южной части Ладожского озера и юго-западной части Онежского озера ( $h_{3\%}^{5\%} = 2,0$  м)**

$h_{3\%} (h_{1\%})$ м	$Q(h_{3\%}   h_{3\%}^{np})$ при $h_{3\%}^{np}$ , м		
	$h_{3\%}^{np} = 1,75$ м ( $h_{1\%}^{np} \approx 2,0$ м)	$h_{3\%}^{np} = 1,5$ м ( $h_{1\%}^{np} \approx 1,73$ м)	$h_{3\%}^{np} = 1,25$ м ( $h_{1\%}^{np} \approx 1,44$ м)
1,75 (2,0)	0,210	0,152	0,089
2,0 (2,3)	0,130	0,085	0,042
2,5 (2,88)	0,041	0,021	0,007
3,0 (3,45)	0,019	0,004	0,001
3,5 (4,03)	0,002	0,0005	–

Результаты, представленные в табл. 4, показывают, что вероятность превышения высоты волны ( $h_{1\%} = 2,0$  м, при благоприятном прогнозе достаточно высока, поэтому должна быть учтена при планировании эксплуатации судов в рассматриваемых бассейнах. Развитие волнения зависит от скорости ветра, длины разгона волны и глубины акватории. Для наиболее протяженной трассы в Ладожском озере зависимость высоты волны от скорости и продолжительности действия ветра представлена в табл. 3, из которой следует, что умеренная заливаемость трюма открытых судов возможна при скорости ветра менее 12 м/с.

#### 4. Теоретические расчеты общей прочности и аварийной остойчивости барж

В соответствии с Правилами Речного Регистра [1] и [7] суда, находящиеся в эксплуатации должны отвечать требованиям прочности и аварийной остойчивости.

При проверке общей продольной прочности должно выполняться неравенство

$$M_{np,экс} \geq K_{годн} |M_p|,$$

где  $M_{np,экс}$  – предельный момент корпуса судна в эксплуатации, определенный с учетом износов и остаточных деформаций;

$K_{годн}$  – нормативное значение коэффициента запаса прочности для годного технического состояния, принимаемое для судов класса «О» равным 1,15;

$|M_p|$  – расчетный изгибающий момент.

Требования Правил РРР к аварийной посадке и остойчивости при затоплении отсеков изложены в 4.2 ПКПС, ч. II [7] и состоят в следующем:

- 1) предельная линия погружения не входит в воду;
- 2) нижние кромки открытых отверстий, через которые вода может распространяться в неповрежденные отсеки возвышаются над аварийной ватерлинией не менее чем на 0,075 м;
- 3) аварийная остойчивость соответствует требованиям:
  - значение поперечной метацентрической высоты при симметричном затоплении должно быть не менее 0,05 м;
  - значение максимального плеча диаграммы аварийной остойчивости не менее +0,1 м.

Выполнены расчеты для барж: 7666 пр.461Г; 7624 пр.461Г(А); 7675 пр.287/461Д; 7693 пр.Р85А; 7703 пр.81060 с учетом их технического состояния, отраженного в актах дефектации корпусов. Для всех перечисленных барж требования Правил выполняются.

### **Заключение**

В соответствии с п.6.3.1 Правил Российского Речного Регистра ч.0 «Классификация» [1] самоходные и несамоходные сухогрузные суда внутреннего плавания всех классов, допускаемые к эксплуатации в Ладожском и Онежском озерах должны быть оборудованы люковыми закрытиями. Эта запись обусловлена опасениями Речного Регистра за безопасность эксплуатации судов, связанными с возможностью попадания воды в грузовой трюм при нахождении судна на взволнованной поверхности.

В настоящей работе на основании модельных испытаний подтверждена возможность попадания воды в грузовой трюм рассматриваемых проектов барж при волнении  $h_{3\%} > 2,0$  м.

Теоретические исследования показали, что такое волнение может быть реализовано на используемых трассах даже при установленном ограничении на прогнозную высоту волны  $h_{3\%} \leq 1,5$  м в результате неблагоприятной ошибки прогноза.

Достигнутая высота волны зависит от силы ветра, продолжительности его действия, протяженности разгона волны и глубины акватории. В работе показано, что при силе ветра менее 12 м/с высота волны  $h_{3\%}$  не превысит 2,8 м при самых неблагоприятных сочетаниях условий плавания. В связи с этим можно рекомендовать учитывать в прогнозах не только высоту волны, но и указанную величину скорости ветра.

Испытания моделей показали их остойчивость с грузом металла, соответствующем погрузке по расчетную ватерлинию, и при последующем заполнении грузового бункера водой.

Теоретические расчеты подтвердили требования Правил Речного Регистра по обеспечению аварийной посадки и остойчивости при затоплении грузового трюма с грузом щебня массой, соответствующей полной грузоподъемности, и максимальным погрузочным объемом 0,71 м<sup>3</sup>/т. При этом для рассмотренных барж выполняется также требование Правил по обеспечению общей прочности по предельному моменту.

Выполненные исследования, на наш взгляд, являются основанием для составления заявки со стороны судовладельца к Российскому Речному Регистру по изъятию требования установки люковых закрытий рассмотренных судов при их эксплуатации в бассейнах Онежского и Ладожского озер.

### **Список литературы:**

1. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов. Том 1. Часть 0. «Классификация». М. 2019.
2. СПбГУ. Режим волнения в Ладожском озере. Рук. работы з.д.н., д.г.н., проф. Л.И. Лопатухин. СПб. – 2004.
3. ГУ «ААНИИ». Уточнение разрядности Онежского озера по сезонам навигационного времени. Рук. работы д.ф.-м.н. И.В. Лавренов. СПб. – 2006.
4. РосНТО Водного транспорта. Районирование Онежского озера по гидрометеорологическим условиям, определяющим безопасность судоходства для судов различных классов. Рук. работы д.г.н., проф. И.Н. Давидан. М. – 2000.
5. Зарбаилов А.Ю. «Ветроволновой режим и условия плавания на Ладожском и Онежском озерах». Труды ЦНИИЭВТ, вып. 43, «Транспорт», 1966.
6. ЗАО «ЦНИИМФ». Разработка требований для судов и плавучих объектов портового и рейдового плавания, находящихся на внутренних водных путях. № 253-Р153/2019-01. Отчет по этапу 1 договора № Р153/10. Рук. работы, к.т.н. Ефименков Ю.И. Ответственный исполнитель Онищенко И.С. СПб. 2019.
7. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов. Том 2. Часть 2. «Остойчивость, непотопляемость, надводный борт». М. 2019.

8. Регистр СССР. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. Л. Транспорт. 1974 – 359 с.
9. Лопатухин Л.И. «Ветровое волнение», СПбГУ, СПб. – 2004.
10. ЗАО «ЦНИИМФ». Подготовка проекта изменений и дополнений в Правила Регистра в связи с введением в существующий список знаков ограничений района плавания знака R2-RSN(4,5). Рук. работы к.т.н. Ефименков Ю.И. СПб. – 2011.
11. Беляк Ю.Л. Освоение морских прибрежных районов судами внутреннего плавания. – М.: Транспорт, 1967.
12. ОАО «Инженерный центр судостроения. Классификация морских районов для судов смешанного (река-море) плавания, в том числе пассажирских и разъездных. Отчет по договору № P26/04-5616. Предложения по корректировке.

## GROUPS FOR THE POSSIBILITY OF OPERATION OF SOME CARGO VESSELS IN ONEZHSKOE AND LADOZHSKOE LAKES WITHOUT HATCH COVERS

**Stanislav N. Girin,**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The requirements of the Rules of the Russian River Register on equipping cargo ships of all classes operating in the basins of Onega and Ladoga lakes with hatch covers for cargo holds are stated. The possibility of withdrawing the requirements on using hatch covers provided for by the Rules of the River Register is used by proving the equal operational safety of ships of the projects under consideration without hatch covers. The barges of projects 461G, R85, 81060, designed for loading bulk cargo by hydraulic filling and without hatch covers of cargo holds are considered. To prove the possibility of their operation in these basins without hatch covers, the results of model tests of ships in the experimental pool, as well as theoretical calculations of the total strength and emergency stability are used. The results obtained can be used by shipping companies that have vessels of these projects.*

*Keywords: bunker vessels, hydraulic filling, Rules of the Russian River Register, unsinkability, total strength, model tests, theoretical calculations.*

### References:

1. Rossijskij Rečnoj Registr. Pravila klassifikacii i postrojki sudov (Russian River Register. Rules for classifying and building ships). Tom 1. Chastj 0. «Klassificacia». M. 2019.
2. SPbGU. Regim volnenia v Ladogskom ozere (Disturbance mode in Ladoga Lake). Ruk. rabot prof. L.I. Lopatuhin. SPb. – 2004.
3. GU «AANII». Utochnenie razriadnosti Onegskogo ozera po sezonam navigacionnogo vremeni (Clarification of the discharge of Onega Lake by the seasons of navigational time). Ruk. rabot dok. I.V. Lavrenov. SPb.-2006
4. RosNTO Vodnogo transporta. Rajjonirovanie Onegskogo ozera po gidrometeorologičeskim usloviam, opredeljaščim bezopasnostj sudohodstva dlja sudov različnih klassov (Zoning of Onega Lake by hydrometeorological conditions that determine the safety of navigation for ships of different classes). Ruk. rabot prof. I.N. Davidan. M.-2000.
5. Zarbailov A.J. Vetrovolnnoj rejim i uslovja plavania na Ladogskom i Onegskom ozerax (Wind wave mode and swimming conditions on Ladoga and Onega lakes). Trudi CNIIEVT, vip. 43. «Transport», 1966.
6. ЗАО «ЦНИИМФ». Razrabotka trebovanij dlja sudov i plavuchih objektov portovogo i rejidovogo plavania, nahodiachihsia na vnutrennih vodnih putiah (Develop requirements for ships and floating port and raid facilities on inland waterways). №253-R153/2019-01. Otchet po Etapu 1 dogovora №R153/10. Ruk. Efimenkov J.I. Otvetstvennij ispolnitel Onischenko I.S. SPb. 2019.
7. Rossijskij Rečnoj Registr. Pravila klassifikacii i postrojki sudov (Russian River Register. Rules for classifying and building ships). Tom 2. Chastj 2. «Ostojčivostj, nepotpliaemostj, nadvodnij bort». M. 2019.
8. Registr SSSR. Veter i volni v okeanah i moriah. Spravochnie dannie. (USSR Register. Wind and waves in the oceans and seas. Background). L.: Transport. 1974 – 359 s.

9. Lopatuhin L.I. «Vetrovoe volnenie» (Wind excitement). SPbGU, SPb.-2004.

10. ЗАО «СНИИМФ». Podgotovka proekta izmenenij i dopolnenij v pravila Registra v sviazi s vvedeniem v suchestvujchij spisok znakov ogranichenij rajjona plavania znaka R2-RSN(4,5) (Preparation of draft changes and additions to the Register Rules in connection with the introduction of R2-RSN (4,5) in the existing list of symbols of the R2-RSN swimming area (4,5). Ruk. Efimenkov J.I. SPb-2011.

11. Belijak J.L. Osvoenie morskikh pribregnih rajjonov sudami vnutrennego plavania (Development of marine coastal areas by inland vessels). – M.: Transport, 1967.

12. ОАО «Инженерий центр судостроения». Klassifikacija morskikh rajjonov dlja sudov smehannogo (reka-more) plavania, v tom chisle passagirskih i razjezdnyh (Classification of marine areas for mixed (river-sea) vessels, including passenger and travel vessels). Otchet po dogovoru №R26/04-5616. Predlogenia po korrekcirovke.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Гирин Станислав Николаевич**, к.т.н., профессор, профессор кафедры теории конструирования инженерных сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: girin.sn@vsuwt.ru

**Stanislav N. Girin**, Ph.D. in Engineering Science, Professor of the Department of theory design of engineering structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

Статья поступила в редакцию 14.05.2020 г.

УДК 556.06

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.96>

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЛЕНОЧНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

**А.В. Ермошкин**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6528-7589>*

**И.А. Капустин**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия  
Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6845-3119>*

**О.А. Даниличева**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9529-2517>*

**Е.И. Поплавский**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**Н.С. Русаков**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация. В статье рассмотрены морфологические особенности растекания пленок поверхностно-активных веществ по поверхности водоема на примере экспериментов на Горьковском водохранилище при различной гидрометеорологической обстановке. В качестве исследуемых веществ использовались: олеиновая кислота, растительное масло, дизельное топливо. Регистрация пленочных загрязнений велась с помощью цифровой когерентной радиолокационной станции MRS-1000 X-диапазона, размещенной на крыше маяка на конце мола аванпорта. Обработка полученных радиолокационных панорам, позволила установить, что физические свойства загрязняющего вещества отражаются в морфологических характеристиках пятен. В частности, свойства вещества проявляются в отношении размеров осей пятен вдоль и поперек направления ветра, а также в эффектах роста и насыщения площади пятен при прочих равных условиях. Не претендуя на способ идентификации вещества на основе полученных данных, можно заключить о наличии указанных эффектов и доступности их наблюдения радиолокационными методами.*

*Ключевые слова: пленочные загрязнения, слики, поверхностно-активные вещества, радиолокация, дистанционное зондирование, мониторинг*

### Введение

Как известно загрязнения водной среды нефтепродуктами представляют значительную угрозу ее обитателям, растениям, а также способствуют непригодности водоема для хозяйственной и рекреационной деятельности [1]. Поскольку основная часть фракций нефти легче воды, нефтепродукты при разливах с судов остаются на поверхности водоема в виде пленочных загрязнений и растекаются в соответствии с физическими свойствами самого вещества и внешними условиями среды (температу-

ра, течение, ветер) [2–5]. С использованием современных методов дистанционного зондирования водной поверхности возможно раннее обнаружение разливов нефтепродуктов, которое может существенно сократить последующие расходы на ликвидацию аварии [6–7]. Существует ряд методов, позволяющих идентифицировать вещество, дистанционно оценив его свойства [8–10]. Однако проблема идентификации нефтепродукта или поверхностно-активного вещества (ПАВ) на водной поверхности, а также его объема остается открытой. Настоящая работа посвящена совсем другому аспекту дистанционного наблюдения и идентификации вещества загрязняющей пленки, связанному с морфологическими особенностями пятен различных веществ, растекающихся по взволнованной водной поверхности.

## 1. Методы и подходы

### *Натурный эксперимент*

Для исследования морфологических особенностей пленочных загрязнений на поверхности водоема были проведены натурные эксперименты в юго-восточной части Горьковского водохранилища. При этом были задействованы два маломерных судна: с первого осуществлялся разлив веществ, а со второго – контроль параметров ветра и течения с помощью акустического доплеровского измерителя течений ADCP Monitor 1200kHz и ультразвукового цифрового измерителя скорости ветра WindSonic. Регистрация пленочных загрязнений велась с помощью цифровой когерентной радиолокационной станции (РЛС) MRS-1000 производства НПО «Микран» г. Томск, работающей в X-диапазоне длин радиоволн. Подобные радиолокаторы СВЧ диапазона – это наиболее эффективное всепогодное средство дистанционного обнаружения пленочного загрязнения на поверхности водоема, как это было показано, например, в [5, 7, 11–13]. В нашем случае, как и в [7], РЛС устанавливалась на крыше маяка на конце мола аванпорта Горьковского водохранилища (рис. 1).



Рис. 1. Эксперимент на Горьковском водохранилище 24.06.2020 г.

Морфологические особенности пятен пленочных загрязнений исследовались для трех веществ: олеиновая кислота (OLE), растительное масло (VO), дизельное топливо (OIL). Во всех экспериментах на поверхность водоема выливалось по 200 мл вещества. В ходе проведения экспериментов резких изменений в направлении течения и ветра не наблюдалось, создаваемые пятна находились в относительно равных условиях с точки зрения их перемещения и деформации, что, в конечном итоге, позволило сравнить их морфологические характеристики. Вещества OLE и VO не являются за-

грязнителями водной среды в используемых объемах, а по окончании экспериментов с OIL, вещество собиралось с поверхности воды механическим способом.

### Обработка

Основным источником данных о форме пятна поверхностно-активного вещества в настоящей работе являлись радиолокационные изображения водной поверхности, полученные радиолокатором кругового обзора. Для лучшего определения контуров слик к временной серии радиолокационных изображений был применен алгоритм обработки, описанный в [5]. Время накопления радиолокационных изображений составило 60 секунд, что приблизительно соответствует 24 оборотам антенны РЛС.

На каждом минутном радиолокационном изображении был выделен контур слика и проведен анализ его морфологических параметров, к которым можно отнести отношение длин наибольшей  $L$  и наименьшей  $l$  осей, а также площадь слика  $S$  (см. например, [14–16]).

## 2. Результаты

Результаты проведенных наблюдений представлены ниже на примере двух дней измерений, когда наблюдались различные гидрометеорологические условия (таблица 1).

Таблица 1

Параметры экспериментов

Номер слика	Дата / время	Тип вещества	Скорость / направление ветра
1	24.06.2020 / 13:48	OLE	10–12 м/с / ССЗ
2	24.06.2020 / 13:49	VO	
3	24.06.2020 / 13:50	OIL	
5	24.06.2020 / 14:09	VO	
6	24.06.2020 / 14:10	OLE	
7	24.06.2020 / 14:25	VO	
8	24.06.2020 / 14:26	OLE	
9	24.06.2020 / 14:28	OLE	
10	24.06.2020 / 14:29	VO	
11	25.06.2020 / 09:05	VO	
12	25.06.2020 / 09:06	OLE	
13	25.06.2020 / 09:07	OLE	
14	25.06.2020 / 09:08	VO	

Пример радиолокационной панорамы водной поверхности, на которой присутствуют пленочные загрязнения, приведен на рис. 2. На изображении хорошо различимы молы аванпорта и береговая линия (светлые области). Область занятая пленочным загрязнением на изображении выглядит как локальное понижение уровня сигнала с резкими границами, что связано с гашением коротких ветровых волн в области пятна [17–18].

На каждом минутном радиолокационном изображении был выделен контур слика и проведен анализ его морфологических параметров, к которым можно отнести отношение наибольшей  $L$  и наименьшей  $l$  осей, а также площадь слика  $S$  [14–16]. Ниже на рис. 3 приведены полученные в ходе обработки радиолокационных изображений перечисленные морфологические параметры слик в зависимости от времени растекания вещества, а на рис. 4–5 приведены визуальные примеры различия в трансформации контуров единовременно созданных пятен различных веществ на примере растительного масла (пятно №7) и олеиновой кислоты (пятно №8).

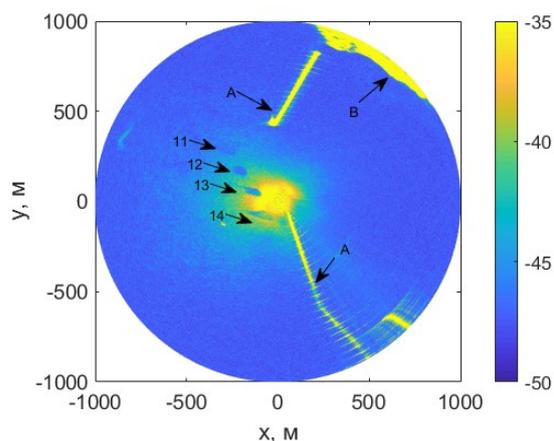


Рис. 2. Радиолокационная панорама водной поверхности, полученная на Горьковском водохранилище 25.06.2020 в 09:43: А – молы аванпорта, В – берег, 11–14 – слики в соответствии с таблицей 1, радиолокатор установлен в центре координат

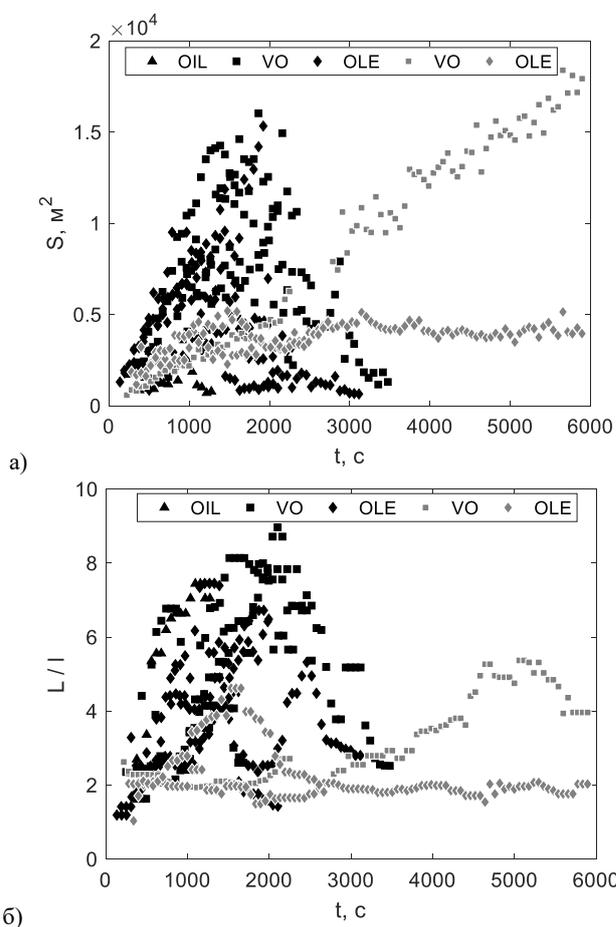


Рис. 3. Морфологические особенности пятен поверхностно-активных веществ как функции времени: площадь пятна (а), отношение осей (б). Черные метки соответствуют сликам 1–10 при сильном ветре, серые –11–14 при слабом ветре

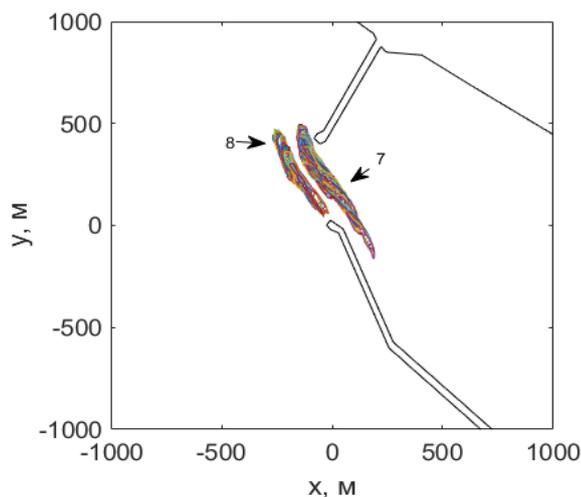


Рис. 4. Демонстрация различной морфологии двух одновременно образованных пятен различных веществ на примере пятен №7 (VO) и №8 (OLE)

### 3. Обсуждение

Как показывает рис. 3, имеются существенные различия в морфологических характеристиках пятен различных веществ в условиях сильного ветра. Так, пятно VO демонстрирует наиболее продолжительный и быстрый рост площади при прочих равных условиях. При этом наибольшее отношение осей достигается для пятна OIL. Для пятен всех веществ наблюдается эффект уменьшения площади на больших временах растекания (см. например [15, 19]). Наиболее резкому падению площади и сжатию в поперечном направлении подвержены пятна OLE, в то время как VO демонстрирует более пологий спад площади в условиях сильных ветров. Из рис. 3 видно, что сжатие пятна происходит на временах примерно в 2 раза меньших, чем его растекание. Однако в отдельных случаях наблюдается резкое падение площади (рис. 5), причины которого пока не установлены. В условиях умеренного и слабого ветра обнаруженные различия только усиливаются.

В работе [20] представлены морфологические характеристики разливов OLE в условиях умеренных и слабых ветров, полученные методом «оконтуривания» пятна моторной лодкой с GPS-приёмником на борту. Пятна, исследуемые в [20], достигают своей максимальной площади (~5000 м<sup>2</sup>) примерно через час после начала разлива, что хорошо согласуется с данными, представленными в настоящей работе. Хорошее соответствие между морфологическими характеристиками разливов, полученными разными способами, говорит о возможности совместного использования обоих методов регистрации формы пятен ПАВ в будущих исследованиях.

Нельзя не сказать несколько слов и о возможных ошибках в определении представленных морфологических характеристик. Основные трудности наблюдались в определении отношения размеров осей пятен в связи с частыми флуктуациями этого параметра. Причиной их возникновения служил автоматизированный подход к представлению пятна эллипсом и определению его главных осей. Из рис. 4–5 становится понятным, что такой подход зачастую может привести к тому, что в связи с трансформацией пятна и поворотом соответствующего эллипса, выбранные полуоси могут не совпасть с полуосями вдоль и поперек направления ветра, в результате чего возникает ошибка. Тем не менее, для получения предварительных оценок динамики морфологических характеристик пятен такого рода ошибки могут быть устранены путем применения медианного фильтра, что и было сделано при построении рис. 3б.

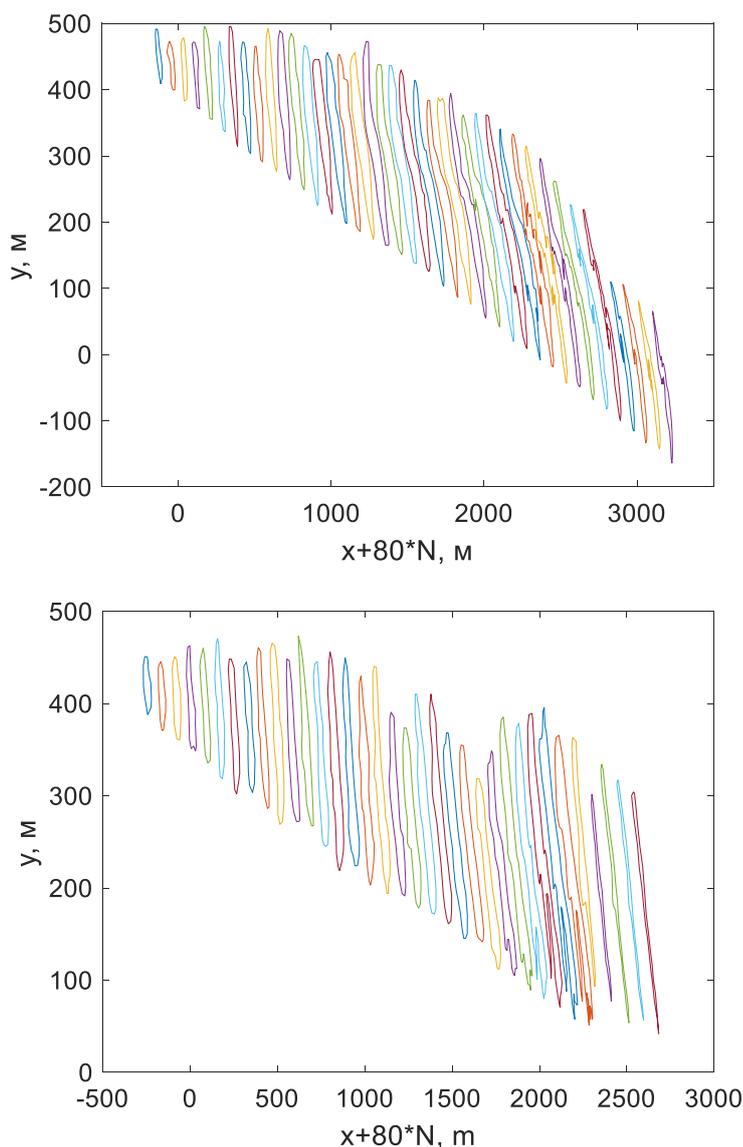


Рис. 5. Динамика трансформации контуров пятен №7 (сверху) и №8 (снизу) с временным шагом в 1 минуту. Горизонтальная координата смещена на эквидистантное расстояние 80м для каждого последующего контура с целью избегания перекрытия

### **Заключение**

Проведенные натурные эксперименты по радиолокационному зондированию пятен загрязняющих веществ на водной поверхности показали, что физические свойства загрязняющего вещества отражаются на морфологических характеристиках пятен. В частности, свойства вещества проявляются в отношении осей пятен вдоль и поперек направления ветра, а также в эффектах роста и насыщения площади пятен при прочих равных условиях. Не претендуя на способ идентификации вещества на основе полученных данных, можно заключить о наличии указанных эффектов и доступности их наблюдения радиолокационными методами. Более детальный анализ полученных данных планируется провести в ходе дальнейшей работы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-35-20054 мол\_а\_вед.

#### Список литературы:

1. Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов. Москва: Студия Ф1, 2019. – 572 с.
2. Моделирование процесса растекания нефти при выполнении судами в счалах погрузо-разгрузочных операций (ПРО)/ Е.Ю. Чебан, И.А. Капустин, А.А. Мольков, М.В. Игонина// Речной транспорт (XXI век)-2015. – № 5 (76) – с. 42–47.
3. Журбас В.М. Основные особенности распространения нефти в море/ В. М. Журбас // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа, М.: ВИНТИ – 1978. -т. 12.– с. 144–159.
4. Fingas M., A review of oil spill remote sensing/ M. Fingas, C.E. Brown // Sensors. -2018. Vol. 18. – №. 1. – P. 91.
5. Об оценке вклада приводного ветра в кинематику slickов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения/ И.А. Капустин, А.В. Ермошкин, Н.А. Богатов, А.А. Мольков //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса -2019. -Т. 16. -№ 2. – С. 163–172.
6. Чебан Е.Ю. Техничко-экономическая оценка реализации положения о функциональной под-системе организации работ по предупреждению и ликвидации разливов нефти на внутренних водных путях России/ Е.Ю. Чебан, В.М. Иванов, А.И. Кузьмичев // В сборнике: Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек. Труды международного научно-промышленного форума. Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов. ВГБОУ ВО ННГАСУ, ФГБОУ ВО "ВГУВТ". -2017. -С. 17.
7. Макет системы экологического мониторинга пленочных загрязнений в акватории Горьковского водохранилища/ А.В. Ермошкин, И.А. Капустин, А.А. Мольков, Е.И. Поплавский, Н.С. Русаков //Научные проблемы водного транспорта -2020. – № 62– с. 11–19. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.35>
8. Дистанционные методы определения толщин пленок нефти и нефтепродуктов на морской поверхности / А.А. Мольков, И.А. Капустин, А.В. Ермошкин, С.А. Ермаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. -2020. -Т. 17.– №3.– С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27
9. Interpreting sea surface slicks on the basis of the normalized radar cross - section model using RADARSAT - 2 copolarization dual - channel SAR images / D. V. Ivonin, S. Skrunes, C. Brekke, A. Y. Ivanov //Geophysical Research Letters. -2016. -Vol. 43.– №. 6.– P.2748–2757.
10. Skrunes S., Oil spill characterization with multi-polarization C-and X-band SAR/ S. Skrunes, C. Brekke, T. Eltoft //2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE. - 2012. -P. 5117-5120. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352459>
11. Measuring the Ocean Surface, Available at: <https://www.miros-group.com>
12. Sigma S6 Oil Spill Detection (OSD) System, Available at: <http://rutter.ca/sigma-s6>
13. The SeaDarQ radar system, Available at: <http://www.seadarq.com>
14. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea / J.A. Fay // Oil on the Sea. Plenum New York. – 1969. -P. 53–63.
15. Ермошкин А.В., Исследование особенностей растекания пленок поверхностно-активных веществ на поверхности внутренних водоемов морским навигационным радиолокатором / А.В. Ермошкин, И.А. Капустин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. -2015. -Т. 12. -№ 6. – С. 113–119.
16. Исследование особенностей геометрии пленочных slickов на морской поверхности по данным спутниковых радиолокационных наблюдений/ С.А. Ермаков, О.Ю. Лаврова, И.А. Капустин, Е.В. Макаров, И.А. Сергиевская // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. -2016. -Т. 13.– № 3. -С. 97–105
17. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. / С.А. Ермаков -Н.Новгород: ИПФ РАН, 2010. -164 с.
18. Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water/ I. Sergievskaya, S. Ermakov, T. Lazareva, J. Guo //Marine Pollution Bulletin. -2019. -Vol. 146.– P. 206–214.
19. Ермаков С.А., Об эффекте сжатия пленочного slickа/ С.А. Ермаков, А.В. Ермошкин, Капустин И.А. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14 – № 3 – С. 288–294 <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294>

20. Remote sensing of evolution of oil spills on the water surface / S. Ermakov, I. Kapustin, A. Molkov, G. Leshev, O. Danilicheva, I.Sergievskaya // Proc. SPIE 10784, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions -2018– 107840L (10 October 2018); <https://doi.org/10.1117/12.2325745>

## INVESTIGATION OF MORPHOLOGICAL FEATURES OF FILM POLLUTION ON WATER SURFACE BASED ON RADAR SENSING DATA

**Alexey V. Ermoshkin**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

**Ivan A. Kapustin**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*  
*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Olga A. Danilicheva**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

**Eugene I. Poplavsky**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

**Nikita S. Rusakov**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The article deals with the morphological features of spreading films of surfactants on the surface of the reservoir on the basis of experiments on the Gorky reservoir under various meteorological conditions. The test substances were: oleic acid, vegetable oil, diesel. The registration of film contamination was carried out using X-band digital coherent radar MRS-1000, located on the roof of the lighthouse at the end of the outside harbor. The processing of the obtained radar panoramas made it possible to establish that the physical properties of the pollutant are reflected in the morphological characteristics of the film slicks. In particular, the substance properties are manifested in relation of the slick axes along and across the wind direction, as well as in the effects of growth and saturation of the slick area, all other things being equal. Without claiming to be a method for identifying a substance based on the data obtained, we can conclude that these effects are present and that they can be observed using radar methods.*

*Keywords: film pollution, slicks, surfactants, radar, remote sensing, monitoring*

### References:

1. «Nauchnye problemy ozdorovleniya rossijskikh rek i puti ih resheniya» Sbornik nauchnyh trudov. Moskva: Studiya F1, 2019. 572 p
2. CHEban E.YU., Kapustin I.A., Molkov A.A., Igonina M.V. «Modelirovanie processa rastekaniya nefi pri vypolnenii sudami v schalah pogruzo-razgruzochnyh operacij (PRO)» Rečnoj transport (XXI vek). – 5.76 (2015):42-47.
3. ZHurbas V. M. «Osnovnye osobennosti rasprostraneniya nefi v more.» Itogi nauki i tekhniki. Mekhanika zhidkosti i gaza, M.: VINITI.12(1978): 144-159.
4. Fingas M., Brown C.E. «A review of oil spill remote sensing» Sensors. 18.1(2018): 91.
5. Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Molkov A.A. «Ob ocenke vkladu privodnogo vetra v kinematiku slikov na morskoy poverhnosti v usloviyah ogranichennyh razgonov volneniya» (On the estimation of the contribution of near-surface wind to the kinematics of slicks on the sea surface under conditions of finite wave fetch) Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 16.2 (2019): 163-172
6. CHEban E.Y., Ivanov V.M., Kuzmichev A.I. «Tekhniko-ekonomicheskaya ocenka realizacii polozeniya o funkcionalnoj podsysteme organizacii rabot po preduprezhdeniyu i likvidacii razlivov nefi na vnutrennih vodnyh putyakh Rossii» V sbornike: Problemy ispolzovaniya i innovacionnogo razvitiya vnutrennih vodnyh putej v bassejnah velikih rek. Trudy mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma. Materialy nauchno-metodicheskoy konferencii professorsko-

- prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, specialistov i studentov. VGBOU VO NNGASU, FGBOU VO «VGUVT». (2017):17.
7. Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Ермошкин, А.В., Капустин, И.А., Мольков, Поплавский Е.И., Rusakov, N.S. «Maket sistemy ekologicheskogo monitoringa plenochnyh zagryaznenij v akvatorii Gorkovskogo vodohranilishcha» (Model of system of ecological monitoring of film pollutions in the Gorkovsky reservoir) Nauchnye problemy vodnogo transporta 62 (2020): 11-19. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.35>
  8. Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Ermakov S.A. «Distancionnye metody opredeleniya tolshchin plenok nefi i nefteproduktov na morskoy poverhnosti» Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa 17.3 (2020): 9-27 <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27>
  9. Ivonin D.V., Skrunes S., Brekke C., Ivanov A.Y. «Interpreting sea surface slicks on the basis of the normalized radar cross - section model using RADARSAT - 2 copolarization dual - channel SAR images» Geophysical Research Letters. 43.6 (2016): 2748-2757.
  10. Skrunes S., Brekke C., Eltoft T. «Oil spill characterization with multi-polarization C-and X-band SAR» International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE. (2012): 5117-5120. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352459>
  11. Measuring the Ocean Surface, Web. <<https://www.miros-group.com>>
  12. Sigma S6 Oil Spill Detection (OSD) System, Web. <<http://rutter.ca/sigma-s6>>
  13. The SeaDarQ radar system, Web. <<http://www.seadarq.com>>
  14. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea. Oil on the Sea. Plenum New York. (1969): 53–63.
  15. Ermoshkin A.V., Kapustin I.A. «Issledovanie osobennostej rastekaniya plenok poverhnostno-aktivnyh veshchestv na poverhnosti vnutrennih vodoemov morskim navigacionnym radiolokatorom» Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa 12.6 (2015): 113-119
  16. Ermakov S.A., Lavrova O.Y., Kapustin I.A., Makarov E.V., Sergievskaya I.A. «Issledovanie osobennostej geometrii plenochnyh slikov na morskoy poverhnosti po dannym sputnikovyh radiolokacionnyh nablyudenij» Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 13.3 (2016): 97–105.
  17. Ermakov S.A. Vliyanie plenok na dinamiku gravitacionno-kapillyarnykh voln. N.Novgorod: IPF RAN. 2010. 164 p.
  18. Sergievskaya I. Ermakov S., Lazareva T., Guo J. «Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water» Marine Pollution Bulletin. 146 (2019): 206–214.
  19. Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A. «Ob effekte szhatiya plenochnogo slika» Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 14.3(2017): 288–294 <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294>
  20. Ermakov S., Kapustin I., Molkov A., Leshev G., Danilicheva O., Sergievskaya I., "Remote sensing of evolution of oil spills on the water surface," Proc. SPIE 10784, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2018, 107840L (10 October 2018); <https://doi.org/10.1117/12.2325745>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ермошкин Алексей Валерьевич**, к.ф.-м.н.,  
Заместитель заведующего лабораторией дистанционных методов обнаружения геофизических возмущений, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС–120, ул. Ульянова, 46,  
e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

**Alexey V. Ermoshkin**, Ph.D, Laboratory Manager Deputy of Laboratory of Remote Methods of Geophysical Perturbations Detection, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950,

**Капустин Иван Александрович**, к.ф.-м.н.,  
старший научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС – 120, ул. Ульянова, 46,  
старший научный сотрудник кафедры гидроди-

**Ivan A. Kapustin**, Ph.D., Senior researcher of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanova st, Nizhny Novgorod, 603950, Senior researcher of the Department of Hydrodynamics, Vessel Theory and Ecological Safety, Volga State University of Water Transport,

намики, теории корабля и экологической безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,  
e-mail: kapustin-i@yandex.ru

**Даниличева Ольга Аркадьевна**, младший научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),  
603950, г. Нижний Новгород, БОКС–120,  
ул. Ульянова, 46,  
e-mail: temary-good@yandex.ru

**Поплавский Евгений Иванович**, лаборант-исследователь лаборатории дистанционных методов обнаружения геофизических возмущений, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),  
603950, г. Нижний Новгород, БОКС–120,  
ул. Ульянова, 46,  
e-mail: keercalmandhavefun@mail.ru

**Русаков Никита Сергеевич**, лаборант-исследователь лаборатории дистанционных методов обнаружения геофизических возмущений, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),  
603950, г. Нижний Новгород, БОКС–120,  
ул. Ульянова, 46,  
e-mail: nikitarusakov228@yandex.ru

5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950,

**Olga A. Danilicheva**, Junior researcher of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950,

**Eugene I. Poplavsky**, Research laboratory assistant of Laboratory of Remote Methods of Geophysical Perturbations Detection, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950,

**Nikita S. Rusakov**, Research laboratory assistant of Laboratory of Remote Methods of Geophysical Perturbations Detection, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950,

Статья поступила в редакцию 29.07.2020 г.

УДК 629.123

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.97>

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОСТОГО КРЫЛА С ШАЙБАМИ ПРИ ПОЛЕТЕ У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

**А.Н. Лучков**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-2391-6647>

**Е.Ю. Чебан**

Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-0983-9879>

**Е.В. Журавлев**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-0654-0000>

*Аннотация. Одной из проблем при проектировании экранопланов является определение аэродинамических характеристик крыла вблизи поверхности земли. В настоящей работе рассмотрены 4 метода расчета коэффициента индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  простого крыла с концевой шайбой на различных относительных высотах. Были выполнены расчеты коэффициента  $C_{xi}$  профиля ЦАГИ-876 по формулам: Визельсбергера, Филлипса, Паченкова-Суржика, Мантла. Расчетные значения коэффициентов индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  сравнивались с экспериментальными данными продувок в аэродинамической трубе в Центральном аэро-гидродинамическом институте. Результаты расчетов показали, что все формулы обладают достаточной точностью только до угла атаки 4 градуса. Сделан вывод, что наиболее удобным методом расчета коэффициента индуктивного сопротивления является метод Паченкова-Суржика.*

*Ключевые слова: экраноплан, крыло с концевыми шайбами, коэффициент индуктивного сопротивления, полет у поверхности земли*

### Основные обозначения

$\lambda$  – удлинение крыла;

$C_y$  – коэффициент подъемной силы;

$C_x$  – коэффициент полного аэродинамического сопротивления;

$C_{xi}$  – коэффициент индуктивного сопротивления;

$\Delta C_y$  – изменение коэффициента подъемной силы;

A – коэффициент отвала полярны;

$1-\sigma$  – поправочный коэффициент;

$\bar{h}$  – относительная высота полета;

$\bar{h}_{ш}$  – относительная высота шайбы;

$\bar{h}_n$  – относительная высота полета по высоте шайбы;

L – размах крыла;

$\sigma_f$  – поправочный коэффициент;

e – коэффициент Освальда;

$\tau$  – параметр отстояния;  
 $\xi$  – функция, учитывающая влияние экрана на крыло конечного размаха;  
 $K$  – аэродинамическое качество;  
 $\alpha$  – угол атаки.

### Введение

Полезное влияние экрана на аэродинамические характеристики крыла экраноплана проявляется, во-первых, в ограничении мощности индуктивного вихря на концах крыла (снижении аэродинамического сопротивления), а во-вторых, в увеличении давления под крылом (росте подъемной силы). Отсюда отличие экранопланного крыла от самолетного заключается в способности запереть набегающий поток воздуха под крылом и ограничить его перетекание на верхнюю дужку крыла. Эффект экрана проявляется тем больше, чем меньше отнесенная к хорде крыла высота ее задней кромки над экраном, поэтому при равной площади используют крылья малого удлинения ( $\lambda=1-3$ ) с большой хордой и на концах устанавливают вертикальные пластины (шайбы), уменьшающие зазор между крылом и экраном (рис. 1, 2) [2, 3].

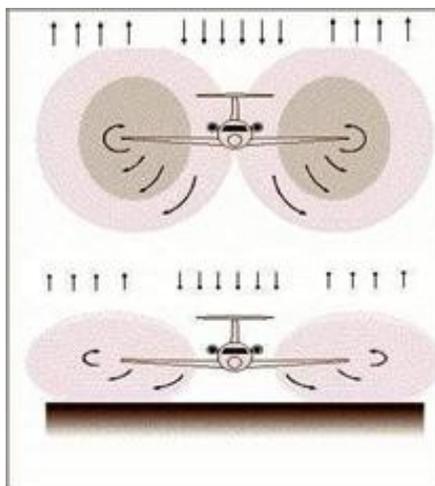


Рис. 1. Схематичное изображение вихря индуктивного сопротивления



Рис. 2. Полет экраноплана «Орленок» у «экрана»

Обоснование геометрических параметров экранопланов на этапе предварительного проектирования выполняется, в основном, по результатам большого количества экспериментов в гидроканале и аэродинамических трубах. Связано это с крайне небольшим количеством эмпирических зависимостей, позволяющих рассчитать значения аэродинамических характеристик коэффициента подъемной силы  $C_y$ , коэффициента сопротивления  $C_x$ , коэффициента индуктивного сопротивления  $C_{xi}$ . Особенностью существующих зависимостей является, как правило, привязка к конкретному профилю крыла и его геометрическим особенностям на виде спереди и сверху. Например, к наиболее обоснованному на данный момент профилю крыла экраноплана со спрямленной нижней частью и выпуклой верхней.

### 1. Постановка задачи

На этапе предварительного проектирования необходимо определение достаточно точных значений аэродинамических характеристик крыла экраноплана. Анализ источников [4–12] показал, что наибольшей точностью при расчете коэффициента подъемной силы  $C_y(h, \alpha)$  обладают методы расчета аэродинамических характеристик через прибавку  $\Delta C_y$  к значению коэффициента подъемной силы  $C_y$  в невозмущенном воздушном потоке. При изучении методов расчета аэродинамических характеристик особое влияние уделялось эксплуатационным углам атаки установки консолей крыльев (4–8 градусов). В указанном диапазоне наибольшая погрешность по сравнению с экспериментальными значениями составляла 12%.

С точки зрения обеспечения точности интересен анализ известных формул расчета индуктивного сопротивления в условиях действия экранного эффекта, что связано с возможным применением этих формул на этапе предварительного проектирования экранопланов на различных относительных высотах полета и углах атаки крыла для дальнейшего выбора предпочтительного облика экраноплана. Решение вопроса выбора наиболее корректной формулы для расчета индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  может существенно удешевить и ускорить этап жизненного цикла «Предварительное проектирование».

Таким образом, целью настоящей работы является исследование точности методов определения индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  и их сравнение с экспериментальными данными прямоугольных крыльев различной формы на виде спереди. В результате должна быть выбрана методика или формула, соответствующая следующим требованиям:

- высокая точность результатов;
- возможность расчета значений коэффициента индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  крыла с концевыми шайбами;
- возможность расчета значений коэффициента индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  крыльев в широком диапазоне углов атаки;

Исследование точности и корректности работы формул было выполнено для крыла со следующими геометрическими характеристиками:

- прямоугольной формы на виде в плане;
- удлинение крыла  $\lambda = 2, 4, 6$ ;
- концевые шайбы относительной высотой  $\overline{h_{ш}} = 0,11$ ;
- диапазон исследуемых углов атаки от  $-4$  до  $14$  градусов;
- диапазон относительных высот  $\overline{h}$  от  $0,2$  до  $8$  ед.

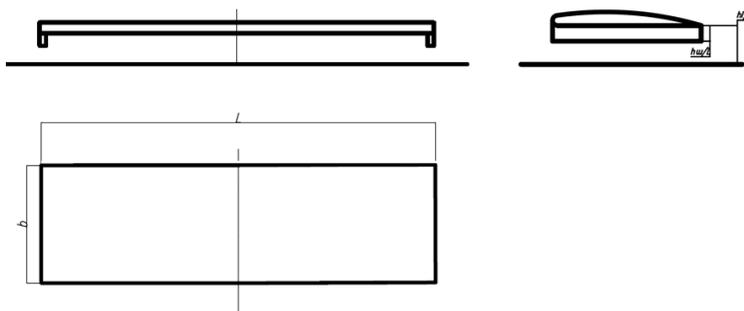


Рис. 3. Общий вид крыла

## 2. Методы расчета коэффициента индуктивного сопротивления $C_{xi}$

На основе анализа источников [4], [7–9], [11–15] были выбраны методы для расчета коэффициента индуктивного сопротивления  $C_{xi}$ .

### 1. Формула Визельсбергера

$$1 - \sigma = 1 - \exp \left[ -2.48 * \frac{\bar{h}^{0.768}}{\lambda} \right] \quad (1)$$

$$C_{xi} = C_y^2 A = (1 - \sigma) \frac{C_y^2}{\pi \lambda} \quad (2)$$

Формула (1) является поправочным коэффициентом для коэффициента отвала профиля А (2), учитывающим влияние экранирующей поверхности. В работе [14] указывается, что при исследовании прямоугольных крыльев экспериментальные значения  $(1 - \sigma)$  с погрешностью до 5–10% совпадают с теоретическими значениями при удлинении крыла  $\lambda \geq 1,5$  (рис. 4). Для учета влияния концевых шайб была использована поправка, предложенная Эшиллом. Для крыла без шайб результаты Эшилла и Визельсбергера совпадают.

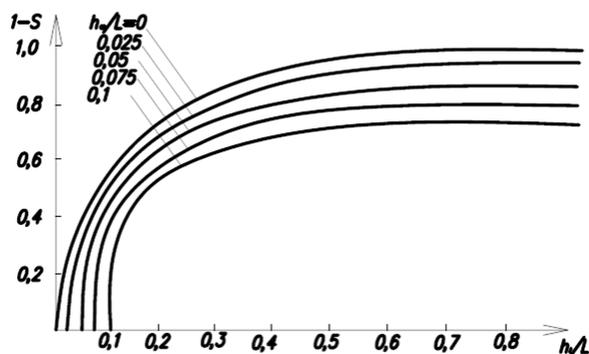


Рис. 4. Кривые Визельсбергера

### 2. Формула Филлипса

$$C_{xi} = C_y^2 A = \sigma \frac{C_y^2}{e \pi \lambda} \quad (3)$$

$$\sigma_f = 1 - \exp \left( -3.88 * \left( \frac{\bar{h}}{\lambda} \right)^{0.66} \right) \quad (4)$$

Поправочный коэффициент (4) был посчитан аналогично формуле (2). Коэффициент  $\sigma$ , как и в случае 1 получен для крыла без шайб, а расчет индуктивного сопротивления для формулы (3) был вычислен по зависимостям Эшилла, (рис. 4). При оценке результатов поправки по Визельсбергеру и Филлипсу были рассмотрены как единый случай.

### 3. Формула Паченкова-Суржика

Расчет индуктивного сопротивления для поправочного коэффициента Паченкова-Суржика выполняется по формуле (5):

$$C_{xi} = C_y^2 A = \xi \frac{C_y^2}{\pi \lambda} \quad (5)$$

$$\xi = 1 - 0,5\tau_\lambda^2 - 0,25\tau_\lambda^4 - 0,0625\tau_\lambda^6 - 0,0469\tau_\lambda^8 - 0,0237\tau_\lambda^{10} - 0,0188\tau_\lambda^{12} - 0,00881\tau_\lambda^{14} \quad (6)$$

$$\tau_\lambda = \sqrt{4 \left(\frac{\bar{h}}{\lambda}\right)^2 + 1} - 2\frac{\bar{h}}{\lambda} \quad (7)$$

Относительная высота полета в случае применения поправочного коэффициента Паченкова-Суржика рассчитывается по формуле (5).

Метод, предложенный А.Н. Паченковым удобен тем, что при расчете индуктивного сопротивления и учета относительной высоты шайбы не нужно пользоваться дополнительными графическими данными. Достаточно применить формулу (8):

$$\bar{h}_n = \bar{h} - \bar{h}_{ш} \quad (8)$$

Формулы (6–8) были использованы для определения оптимальных проектных параметров экспериментальных экранопланов АДП-04М, АДП-05 «Орфей» и СДП-09. С достоверностью результатов применения данных формул можно ознакомиться в работе [13].

### 4. Формула Мантла

Расчет выполняется аналогично случаю 1 по формуле (2). Поправочный коэффициент  $(1 - \sigma)$  при наличии шайб может быть определен по следующему соотношению:

$$(1 - \sigma) = 1,5 \left(\frac{\bar{h}_{ш}}{\lambda}\right) + 5 \left(\frac{\bar{h}}{\lambda}\right) - \frac{10 \left(\frac{\bar{h}}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\bar{h}_{ш}}{\lambda}\right)^{\frac{1}{5}}} \quad (9)$$

Формула (9) является существенно упрощенным вариантом формулы (1) и конечным результатом комплексного представления графического решения Эшилла (рис. 3, 5) для теории индуктивного сопротивления крыльев при влиянии экранного эффекта [4], [13].

Кроме того, формула (9) позволяет учесть изменение индуктивного сопротивления в зависимости от относительной высоты концевых шайб и аналогично методу Паченкова-Суржика, позволяет не использовать графические данные.

По приведенным выше формулам был выполнен расчет значений коэффициентов индуктивного сопротивления для комбинации крыльев, указанной в п. 1. Расчет по формуле Мантла выполнялся для значений относительных высот ниже  $\frac{\bar{h}}{\lambda} = 0,2$  ед., т.к. данная формула не позволяет получить корректные результаты при больших значениях  $\frac{\bar{h}}{\lambda}$ .

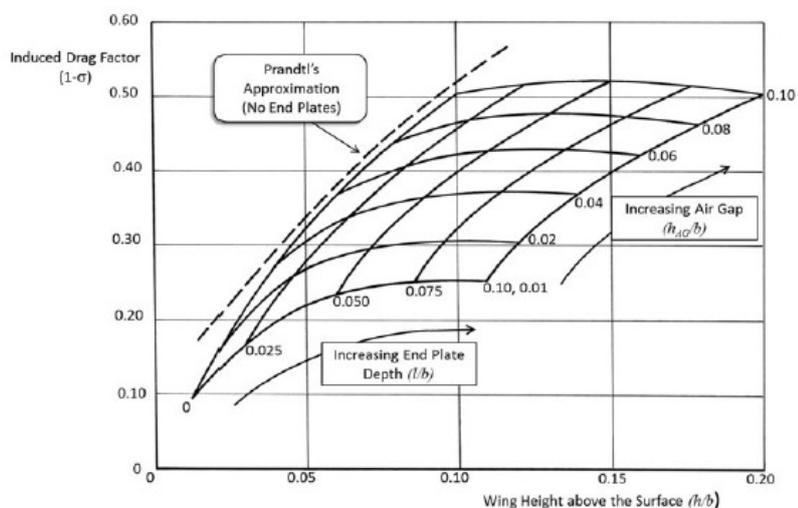


Рис. 5. Перекрестный график теории Эшилла, показывающий влияние воздушного зазора на индуцированное сопротивление [4].

Сравнение результатов расчетов выполнялось с экспериментальными данными продувок методом жесткого экрана и зеркального отображения.

### 3. Анализ результатов

На рис. 6–11 приведены совмещенные графики изменения коэффициентов индуктивного сопротивления по углу атаки для относительных высот 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,75, 8 ед. в сравнении с экспериментальными данными по продувкам крыла в аэродинамической трубе ЦАГИ. В табл. 1-3 приведены значения погрешностей каждого из методов для корректности расчетов.

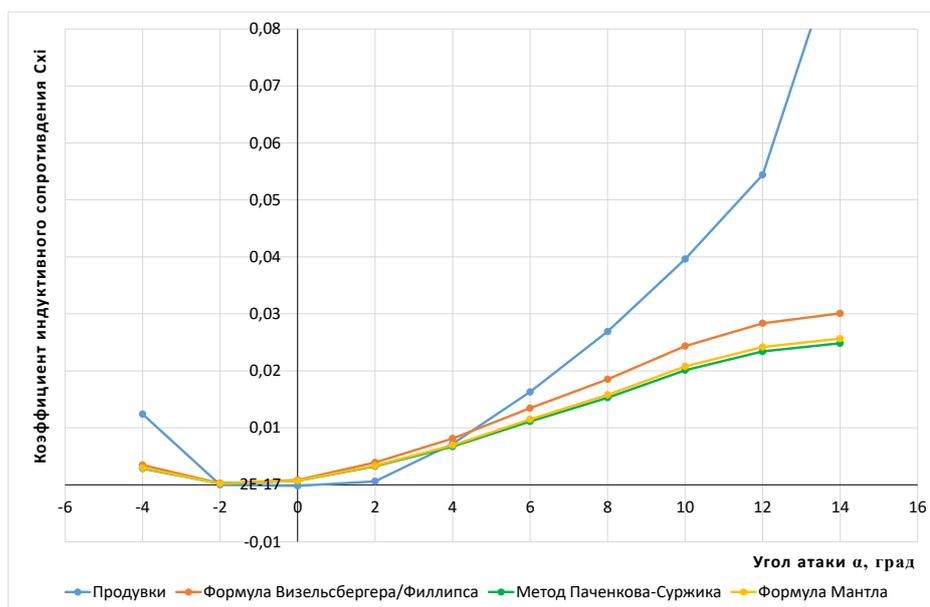


Рис. 6. Зависимость индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  от угла атаки, относительная высота 0,2

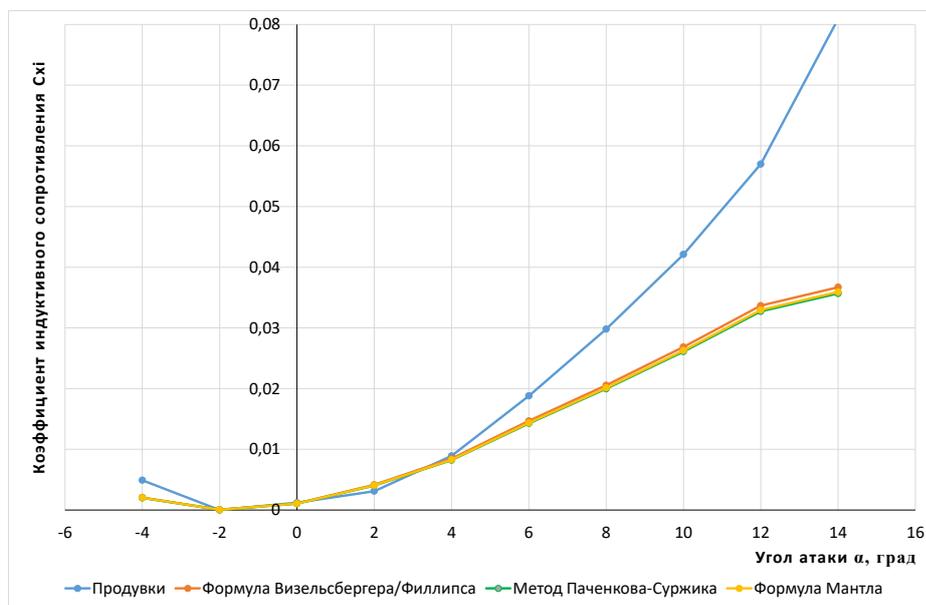


Рис. 7. Зависимость индуктивного сопротивления  $S_{xi}$  от угла атаки, относительная высота 0,3.

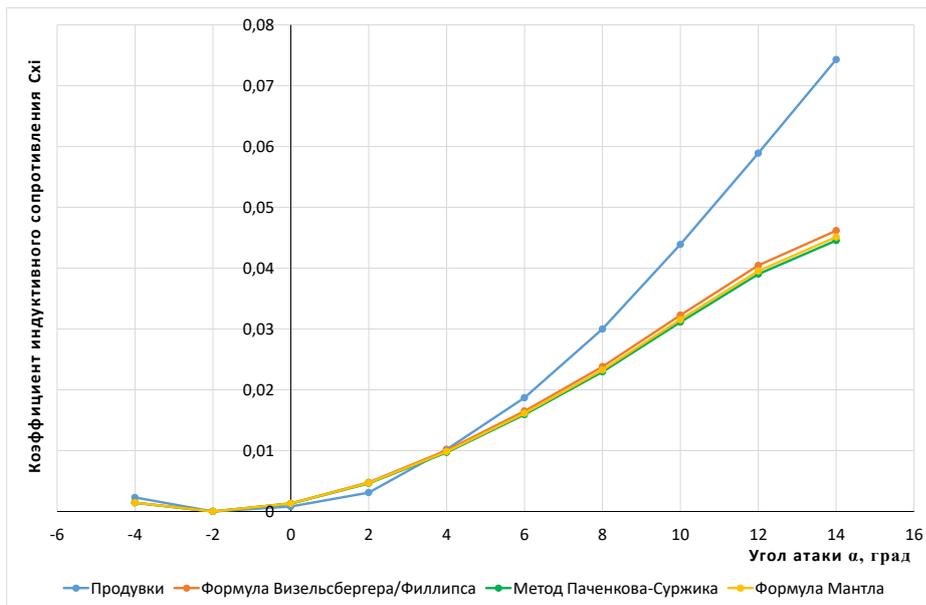


Рис. 8. Зависимость индуктивного сопротивления  $S_{xi}$  от угла атаки, относительная высота 0,4.

Из анализа графиков и табл. 1 видно, что выбранные формулы дают корректные результаты только на углах атаки до 4 градусов. Это может быть объяснено тем, что формулы специально выводились именно для данных углов атаки и использовать их для комплексного анализа аэродинамических характеристик отдельного крыла или экраноплана нельзя. Однако формулы могут быть использованы для оценки индуктивного сопротивления  $S_{xi}$  и аэродинамического качества  $K$  на рабочих углах атаки экраноплана.

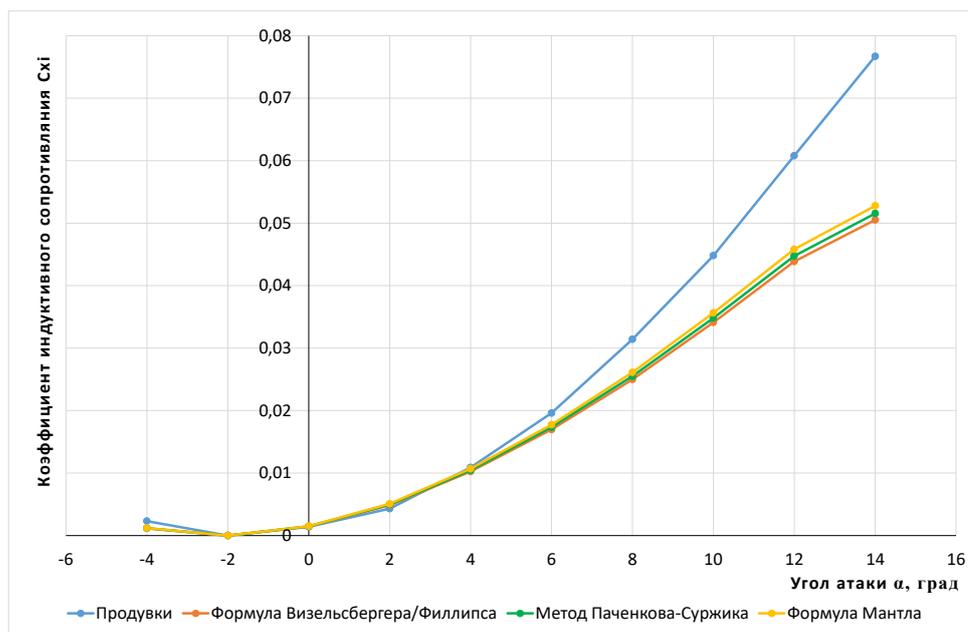


Рис. 9. Зависимость индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  от угла атаки, относительная высота 0,5.

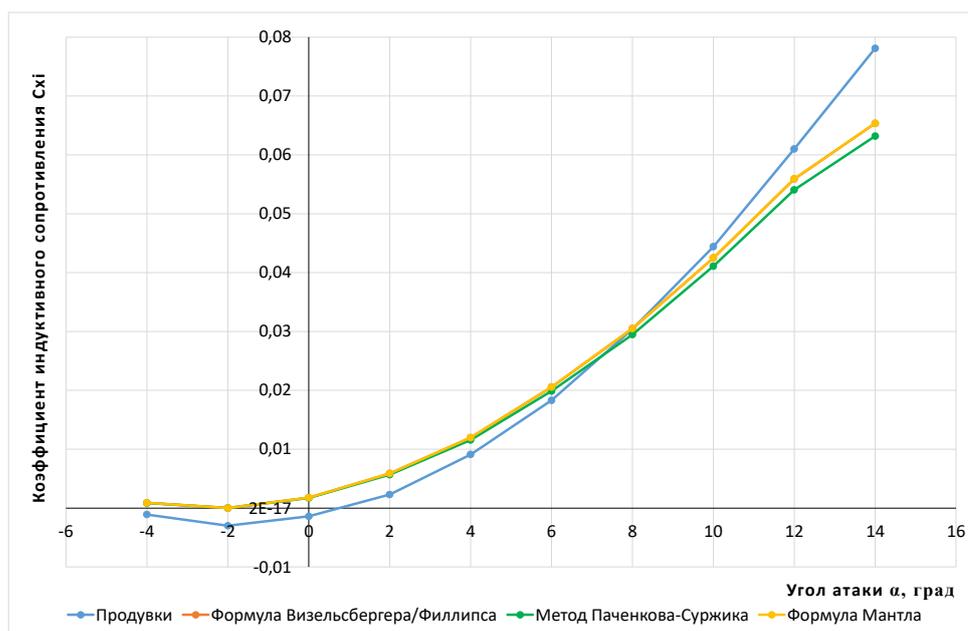


Рис. 10. Зависимость индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  от угла атаки, относительная высота 0,75.

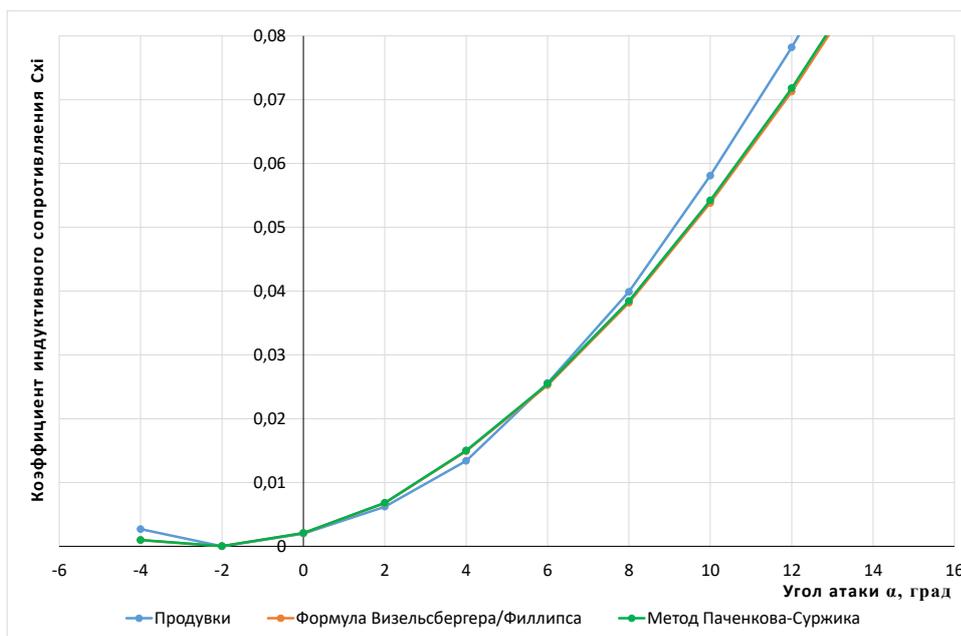


Рис. 11. Зависимость индуктивного сопротивления  $S_{xi}$  от угла атаки, невозмущенный скоростной напор

Таблица 1

Погрешности. Метод Паченкова-Суржика

		Относительная высота $\bar{h}$					
		8	0,75	0,5	0,4	0,3	0,2
Угол атаки $\alpha$ , град	-4	63,37	177,91	48,90	38,62	59,22	77,00
	-2	-	-	-	-	-	-
	0	-4,42	222,44	-4,74	-60,11	12,78	449,41
	2	-10,05	-147,03	-15,32	-48,79	-30,08	-440,00
	4	-12,06	-27,13	4,14	4,92	7,70	6,77
	6	0,62	-8,59	11,66	14,86	24,15	31,80
	8	3,63	3,06	18,80	23,47	32,97	43,18
	10	6,67	7,47	22,29	29,09	38,00	49,24
	12	8,18	11,39	26,40	33,75	42,58	56,97
	14	8,53	19,10	32,79	40,05	55,90	74,05
	16	12,76	43,80	60,85	67,13	75,21	86,12
	18	38,56	-	74,65	78,93	86,06	91,24
20	54,45	-	84,26	85,84	89,52	93,24	

Для крыла с удлинением  $\lambda=2$  и 6 ед. были получены идентичные результаты.

Результаты расчетов показали, что наиболее удобным способом расчета индуктивного сопротивления является метод Паченкова-Суржика, т.к. он позволяет получать корректные значения индуктивного сопротивления без использования графических данных. Также метод удобен тем, что может быть использован во всех диапазонах относительных высот полета и дает сравнимые по точности с другими методами значения поправочного коэффициента.

Таблица 2

Погрешности. Формула Визельсбергера/Филлипса

		Относительная высота $\bar{h}$					
		8	0,75	0,5	0,4	0,3	0,2
Угол атаки $\alpha$ , град	-4	63,64	180,57	49,92	36,38	58,05	72,15
	-2	-	100,48	-	-	-	-
	0	-3,64	226,63	-2,65	-65,96	10,26	523,08
	2	-9,22	-155,49	-13,02	-54,23	-33,83	-553,86
	4	-11,22	-31,48	6,05	1,44	5,04	-12,89
	6	1,37	-12,30	13,42	11,75	21,96	17,42
	8	4,35	-0,26	20,42	20,67	31,04	31,19
	10	7,38	4,30	23,84	26,50	36,21	38,53
	12	8,87	8,36	27,87	31,33	40,93	47,90
	14	9,22	16,33	34,12	37,86	54,63	68,57
	16	13,41	41,88	61,63	65,93	74,49	83,20
	18	39,02	-	75,16	78,16	85,66	89,39
20	54,80	-	84,57	85,32	89,22	91,82	

Таблица 3

Погрешности. Формула Мангла

		Относительная высота $\bar{h}$					
		8	0,75	0,5	0,4	0,3	0,2
Угол атаки $\alpha$ , град	-4	910,84	180,61	47,68	37,83	58,94	76,24
	-2	-	100,48	-	-	-	-
	0	2411,27	226,69	-7,24	-62,17	12,18	460,96
	2	2535,83	-155,60	-18,07	-50,71	-30,97	-457,85
	4	2580,32	-31,54	1,85	3,69	7,07	3,69
	6	2299,54	-12,36	9,55	13,76	23,63	29,55
	8	2233,06	-0,31	16,86	22,48	32,52	41,30
	10	2165,61	4,26	20,43	28,18	37,58	47,56
	12	2132,28	8,32	24,64	32,90	42,19	55,55
	14	2124,63	16,29	31,18	39,28	55,60	73,19
	16	2030,98	41,85	59,91	66,70	75,04	85,66
	18	1459,96	-	74,05	78,65	85,97	90,95
20	1108,09	-	83,88	85,66	89,45	93,02	

Однако из рассмотрения графиков и таблиц видно, что все методы обладают удовлетворительной точностью только до угла атаки 4 градуса. Это может быть связано с проблемой непостоянства поправочного коэффициента  $1-\sigma$  по углу атаки. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, эта проблема является малоизученной и требует дополнительных исследований.

Список литературы:

1. Белавин Н.И. Экранопланы // Ленинград. Судостроение. 1977 – 227 с.
2. Jia, Q., Yang, W., Yang, Z. Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect,

- Tongji University, Shanghai, China, 2016.
3. L. Yun, A. Bliault, J. Doo, WIG Craft and Ekranoplan, Springer, New York, 2010.
  4. P.J. Mantle, Induced drag of wings in ground effect, Washon, Washington USA, 2016
  5. Carter, A.W. Effect of Ground Proximity on the Aerodynamic Characteristics of Aspect Ratio 1 Airfoils With and Without End Plates, NASA Technical Note D-970, October 1961, Langley Aeronautical Laboratory, Virginia, US.
  6. Ashill, P.R. On the minimum induced drag of ground-effect wings, The Aeronautical Quarterly, August 1970, XXI, Part 3.
  7. M.Tavakoli Dakhrabadi, M.S.Seif, Ground Effect on the Vortex Flow and Aerodynamics of a Slender Delta Wing, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
  8. J.D. Anderson, Aircraft Performance and Design, McGraw-Hill, New York, 1999.
  9. M. Tavakoli Dakhrabadi, M.S. Seif, A practical method for aerodynamic investigation of WIG, Int. J. Aircr. Eng. Aerosp. Technol, 2016.
  10. K. Park, J. Lee, Influence of endplate on aerodynamic characteristics of low-aspect ratio wing in ground effect, J. Mech. Sci. Technol. 22 (2008).
  11. K.H. Jung, H.H. Chun, H.J. Kim, Experimental investigation of wing in ground effect with a NACA6409 section, J. Mar. Sci. Technol. 13 (2008).
  12. Амплитов П.А., Феоктистов С.И., Влияние геометрических параметров экраноплана типа А на его весовые и экономические характеристики, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, 2013
  13. Суржик В.В. Методы структурно-параметрического синтеза математических моделей экранопланов, Иркутский государственный университет путей сообщения ИргУПС, Иркутск, Россия, 2010.
  14. Жуков В.И. Особенности аэродинамики, устойчивости и управляемости экраноплана, М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1997.
  15. А.Н. Панченков, Экспертиза экранопланов / А.Н. Панченков, П.Т. Драчев, В.И. Любимов. – Н.Новгород: ВГАВТ, 2006. – 520 с.

## THE ESTIMATION OF APPLICABILITY CONCERNING THE METHODS FOR CALCULATION OF A SIMPLE WING WITH WINGTIPS INDUCTIVE RESISTANCE DURING THE FLIGHT NEAR THE EARTH SURFACE

**Andrey N. Luchkov**

*Moscow Aviation Institute (National Research University), 125993, Moscow, Russia*

**Evgeny Yu. Cheban**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Egor V. Zhuravlev**

*Moscow Aviation Institute (National Research University), 125993, Moscow, Russia*

*Abstract. One of the problems in the hovercrafts design is to determine the aerodynamic characteristics of the wing near the earth surface. In this article, 4 methods for calculating the induced drag coefficient  $C_{xi}$  of a simple airfoil with an end plate at different relative heights were considered. Four methods of induced drag coefficient determination were considered for different relative flight's heights. Calculations were performed according to the Phillips, Wieselsberge, Panchenkov-Surzhik, Mantle methods for the TsAGI-876 wing profile. The calculated values of induced drag coefficients were compared with the experimental wind tunnel's data at the Central Aerohydrodynamic Institute. The calculation results showed that all methods have sufficient accuracy only up to an angle of attack of 4 degrees.*

*Keywords: wing-in-ground effect, WIG aircraft, aerodynamic coefficients, calculation method, induced drag coefficient, airfoils with plates*

### References:

1. Belavin N.I. Ekranoplany // Leningrad. Sudostroenie. 1977 – 227 s.

2. Jia, Q., Yang, W., Yang, Z. Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect, Tongji University, Shanghai, China, 2016.
3. L. Yun, A. Bliault, J. Doo, WIG Craft and Ekranoplan, Springer, New York, 2010.
4. P.J. Mantle, Induced drag of wings in ground effect, Vashon, Washington USA, 2016
5. Carter, A.W. Effect of Ground Proximity on the Aerodynamic Characteristics of Aspect Ratio 1 Airfoils With and Without End Plates, NASA Technical Note D-970, October 1961, Langley Aeronautical Laboratory, Virginia, US.
6. Ashill, P.R. On the minimum induced drag of ground-effect wings, The Aeronautical Quarterly, August 1970, XXI, Part 3.
7. M.Tavakoli Dakhrabadi, M.S. Seif, Ground Effect on the Vortex Flow and Aerodynamics of a Slender Delta Wing, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
8. J.D. Anderson, Aircraft Performance and Design, McGraw-Hill, New York, 1999.
9. M. Tavakoli Dakhrabadi, M.S. Seif, A practical method for aerodynamic investigation of WIG, Int. J. Aircr. Eng. Aerosp. Technol, 2016.
10. K. Park, J. Lee, Influence of endplate on aerodynamic characteristics of low-aspect ratio wing in ground effect, J. Mech. Sci. Technol. 22 (2008).
11. K.H. Jung, H.H. Chun, H.J. Kim, Experimental investigation of wing in ground effect with a NACA6409 section, J. Mar. Sci. Technol. 13 (2008).
12. Amplitov P.A., Feoktistov S.I., Vliyaniye geometricheskikh parametrov ekranoplana tipa A na ego vesovye i ekonomicheskie harakteristiki, Komsomol'skij-na-Amure gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, Komsomol'sk-na-Amure, Rossiya, 2013
13. Surzhik V.V., Metody strukturno-parametricheskogo sinteza matematicheskikh modelej ekranoplanov, Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya IrGUPS, Irkutsk, Rossiya, 2010.
14. Zhukov V.I. Osobennosti aerodinamiki, ustojchivosti i upravlyaemosti ekranoplana, M.: Izdatel'skij otdel CAGI, 1997.
15. A.N. Panchenkov, Ekspertiza ekranoplanov / A.N. Panchenkov, P.T. Drachev, V.I. Lyubimov. – N.Novgorod: VGAVT, 2006. – 520s.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Лучков Андрей Николаевич**, инженер лаборатории №4 «Управление жизненным циклом изделия» НИО 101 кафедры проектирование самолетов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: a.luchOK.n@gmail.com

**Журавлев Евгений Васильевич**, ведущий конструктор, начальник лаборатории №4 «Управление жизненным циклом изделия» НИО 101 кафедры проектирование самолетов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: e.zhuravlev\_mai@mai.ru

**Чебан Егор Юрьевич**, к.т.н., доцент кафедры теории корабля и строительной механики, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.  
E-mail: egor.cheban.2@gmail.com

**Andrey N. Luchkov**, engineer of laboratory No. 4 «Product Lifecycle Management» Research Institute 101, Department of Aircraft Design, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamsk Highway, Moscow, A-80, GSP-3, 125993  
Email: a.luchOK.n@gmail.com

**Evgeny V. Zhuravlev**, Lead Designer, Head of Laboratory No. 4, Product Lifecycle Management, Research Institute 101, Department of Aircraft Design, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoye av, Moscow, A-80, GSP-3, 125993  
E-mail: e.zhuravlev\_mai@mai.ru

**Egor Y. Cheban**, Ph.D., associate professor of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory and ecological safety Mechanics, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st., Nizhny Novgorod, 603951  
Email: egor.cheban.2@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29.04.2020 г.

УДК 629. 5.01

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.98>

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СКОРОСТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ КАТАМАРАНОВ

**С.С. Метелица**

*Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е.Алексеева,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6336-0685>*

*Аннотация. Данная работа посвящена оптимизации главных размерений при проектировании скоростных пассажирских катамаранов. Показаны доминирующие факторы, влияющие на выбор главных размерений скоростных катамаранов на начальных стадиях проектирования. Рассмотрены особенности пассажирских перевозок с помощью различных типов скоростных судов, показана доля скоростных пассажирских катамаранов от общего числа строящихся пассажирских судов. Приведен краткий обзор наиболее распространенных компоновочных решений, используемых при проектировании вновь построенных пассажирских катамаранов. Показаны статистические данные по проектным характеристикам вновь построенных скоростных пассажирских паромов. На основе этих данных сформулирован диапазон характерных для данного типа судов главных размерений и проектных характеристик. Даны рекомендации для использования полученных эмпирических зависимостей на начальных стадиях проектирования скоростных пассажирских катамаранов.*

*Ключевые слова: скоростные катамараны, главные размерения, оптимизация, варианты компоновки, пассажировместимость.*

### Введение

Катамараны составляют более половины вновь построенных скоростных пассажирских и автомобильно-пассажирских паромов. В настоящее время работы по созданию скоростных автомобильно-пассажирских катамаранов ведутся во многих странах мира. Среди лидеров отрасли можно выделить страны Европы (Норвегия, Великобритания, Италия, Россия), Тихоокеанского региона (Австралия, Япония, Новая Зеландия), а также ЮАР и США [1]. Активное развитие этой группы судов в последнее время еще недостаточно подкреплено теоретическими обоснованиями проектных характеристик. Несмотря на то, что в предыдущее десятилетие были проведены работы [2], [3], [4] по обоснованию выбора главных размерений скоростных катамаранов разнообразие компоновок данного типа судов ставит новые вопросы. Так, зачастую выбор главных размерений и основных характеристик скоростных катамаранов часто подчиняется только задачам правильного выбора архитектурно-компоновочного типа, полностью или частично исключая влияние ходкости и мореходности на облик будущего судна. В этой связи ключевым вопросом становится обоснование на ранних стадиях проектирования оптимальной длины и поперечного клиренса, которые наиболее сильно влияют на наиболее важные показатели мореходных качеств и на эффективность катамарана в целом.

Среди основных задач на начальном этапе проектирования скоростных катамаранов, которые в первую очередь необходимо решить, является выбор архитектурно-конструктивного типа судна, распределение полезных площадей, выбор гидродинамической компоновки на основе анализа скоростного режима движения и статистических данных. Такой подход позволяет избежать грубых просчетов на дальнейших стадиях проектирования.

## **1. Постановка задачи по оптимизации главных размерений скоростного пассажирского катамарана**

Основой процесса оптимизации главных размерений и проектных характеристик будущего судна является разделение задачи проектирования на два уровня: верхний (оптимизация судна в целом) и нижний (оптимизация подсистем). Взаимодействие подмоделей и характеристик разных уровней может осуществляться путем внедрения локальных критериев оптимизации. Стоит также заметить, что точность определения элементов судна зависит от конкретной стадии проектирования и глубины проработки проекта.

Создание системы взаимодействующих задач для оптимизации судна означает автоматизацию системного проектирования. В данной статье приведены рекомендации по выбору главных размерений скоростных пассажирских катамаранов, для чего были обработаны статистические данные по главным основным характеристикам современных автомобильно-пассажирских паромов. При поиске основных характеристик по данному типу судов широко использовались такие ресурсы, как [5], [6], [7].

В работе [8] и [9] процесс оптимизации основных характеристик судна можно выразить как согласованное решение следующего массива уравнений:

- уравнение нагрузки;
- уравнение плавучести;
- уравнение мощности;
- уравнение объемов и минимально необходимых площадей;
- уравнение управляемости;
- выполнение условий мореходности;
- уравнение остойчивости, выполнение требований непотопляемости и безопасности плавания;
- выполнение условий рациональности конструкций, общей и местной прочности.

Наиболее важными из данных уравнений являются те, в которых определяющими параметрами будут главные размерения, а также те из них, которые влияют на форму и компоновку будущего судна. Величины, входящие в остальное число уравнений, могут оптимизироваться на более поздних стадиях проектирования на основе способа последовательных приближений.

Также следует обратить внимание на разнообразие компоновочных схем при проектировании скоростных катамаранов, которое обусловлено как различным назначением каждого конкретного судна, так и условиями судоходства на каждой конкретной линии, экономическими причинами (такими как величина пассажиропотока), выбранным скоростным диапазоном, а также сложившейся у каждой конкретной инженеринговой организации культуры проектирования.

Анализируя современные тенденции развития архитектуры скоростных пассажирских и автомобильно-пассажирских паромов-катамаранов [10], [11], можно отметить две доминирующие схемы. В первом случае надстройка располагается по всей протяженности главной палубы, также включающей в себя соединительный мост. В противовес данной компоновке существует «пирамидальная» схема расположения ярусов надстройки. В случае применения данного компоновочного решения рулевая рубка, как правило, смещается в корму от мидель-шпангоута. Это позволяет сместить центр парусности, что благоприятно влияет на управляемость при сильном встречном ветре. Также кормовое расположение ходового мостика придает некий динамизм внешнему облику судна, что может вызвать интерес у потенциальных пассажиров. Примеры подобного рода компоновок представлены на рисунках 1–3.



Рис. 1. Автомобильно-пассажирский паром HSS1500



Рис. 2. Автомобильно-пассажирский паром INCAT052



Рис. 3. Пассажирский катамаран Muslim Magomaev

## 2. Статистическое исследование главных размеров скоростных пассажирских катамаранов

Согласно исследованиям, приведенным в работах [12], [13], [14], [15], алгоритм определения главных размеров и проектных характеристик катамарана в зависимости от дедвейта ( $DW$ ) и эксплуатационной скорости хода  $v$  имеет следующую структуру (1).

$$[DW, v] \rightarrow L_1 \rightarrow B_1 \rightarrow Fr_L \rightarrow S_n \rightarrow b \rightarrow L_0 \rightarrow B_0 \rightarrow T \rightarrow V_1 \rightarrow \delta \rightarrow Fr_V \rightarrow N_\Sigma \quad (1)$$

где  $L_1$  – длина одиночного корпуса скоростного катамарана;

$B_1$  – ширина одиночного корпуса скоростного катамарана;

$Fr_L = \frac{v}{\sqrt{gL_1}}$  – величина числа Фруда в зависимости от длины корпуса катамарана;

$S_n$  – ширина главной палубы;

$b$  – поперечный клиренс между корпусами катамарана;

$L_0, B_0$  – габаритные длина и ширина скоростного катамарана;

$T$  – осадка катамарана;

$\delta$  – коэффициент общей полноты одиночного корпуса скоростного катамарана;

$V_1$  – водоизмещение одиночного корпуса катамарана;

$Fr_V = \frac{v}{\sqrt{g^3 V_1}}$  – величина числа Фруда в зависимости от водоизмещения одиночного

корпуса катамарана;

$N_\Sigma$  – суммарная мощность главных двигателей судна.

Поскольку для корректного обоснования основных характеристик скоростного катамарана на начальных этапах проектирования необходимо выделить и сравнить как можно большее количество вариантов компоновок и архитектуры подобного типа судов, при выборе судов-прототипов учитывался довольно большой разброс главных размеров. Так, длина по ватерлинии  $L_{вл}$  варьировалась от 60 м до 121,5 м. Соответственно, показатели авто- и пассажироместимости тоже варьировались в значительном диапазоне. Для выбора главных размеров скоростного катамарана была создана база из 16 современных автомобильно-пассажирских паромов-катамаранов. Данные по судам-прототипам приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики современных скоростных пассажирских катамаранов

Название судна	INCAT 094	INCAT 091	HSS 1500	HSS 900	INCA T 097	INCAT 096	Sea Speed Jet	Man-nanan
Длина по ватерлинии $L_{вл}$ , м	92,1	103,2	125	85	68	121,51	59,9	86
Ширина катамарана $B$ , м	26,6	30,5	40	30	20,6	32,36	26	26,6
Ширина корпуса катамарана $B_0$ , м	4,5	5,8	10	7,5		6,6	4,33	4,5
Осадка расчетная	3,7	4,1	4,5	3,9	2,35	2,5	3,1	3,43
Дедвейт $DW$ , т	720	1000	1500	450	300	600	230	770
Скорость расчетная $V$ , узл	39,5	42,4	40	40	42	37,5	37	38
Мощность ГЭУ $N_e$ , кВт	29120	36400	68000	34000	22000	35200	16200	28800

Название судна	INCAT 094	INCAT 091	HSS 1500	HSS 900	INCA T 097	INCAT 096	Sea Speed Jet	Man-nanan
Количество пассажиров, $n$	1000	1200	1500	900	700	2100	450	600
Количество автомобилей, $n_{авт}$	182	401	375	208	79	229	84	240
Название судна	Megajet	Harmony Flower	Stena Lynx	Champion Jet	Max Mols	Kat Express 2	Volcan de Tirajana	INCAT 082
Длина по ватерлинии $L_{вл}$ , м	63,9	72,3	66,3	76,4	81,3	105,6	59,9	86
Ширина катамарана $B$ , м	26,0	19,0	26	26,0	26,0	30,5	26	26,6
Ширина корпуса катамарана $B_o$ , м	4,3	5,0	4,33	4,33	4,50	5,8	4,33	4,5
Осадка расчетная	3,5	2,16	3,0	3,5	3,73	4,18	3,1	3,43
Дедвейт $DW$ , т	250	174	320	415	510	1497	230	770
Скорость расчетная $V$ , узл	36,0	49,7	44	40	42	42,1	37	38
Мощность ГЭУ $N_e$ , кВт	19680	21680	14400	28320	28320	36000	16200	28800
Количество пассажиров, $n$	600	785	700	900	900	1000	450	600
Количество автомобилей, $n_{авт}$	50	32	181	200	220	415	84	240

На основании приведенных данных были построены зависимости проектных характеристик от длины по ватерлинии  $L_{вл}$  и дедвейта  $DW$ . Графически данные зависимости отображены на рисунках 4–7.

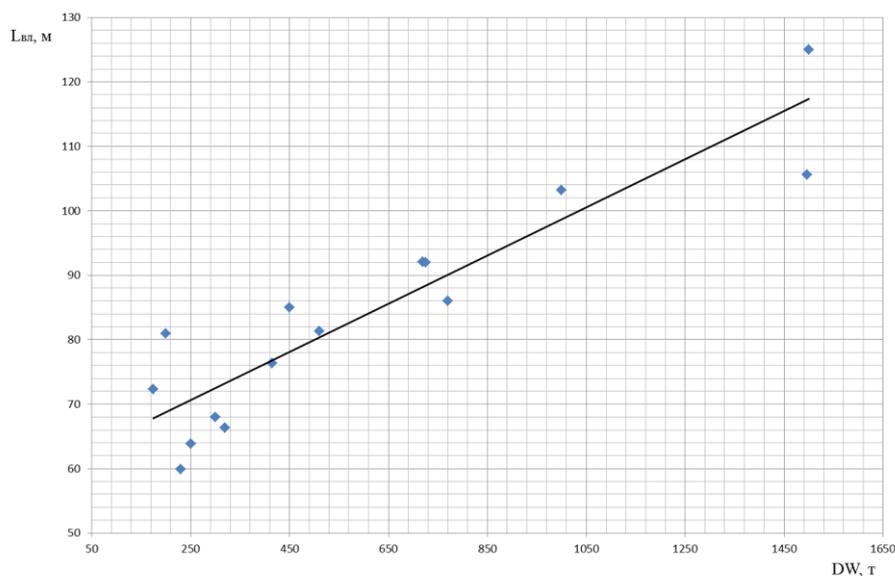


Рис. 4. Зависимость  $L_{вл}$  –  $DW$

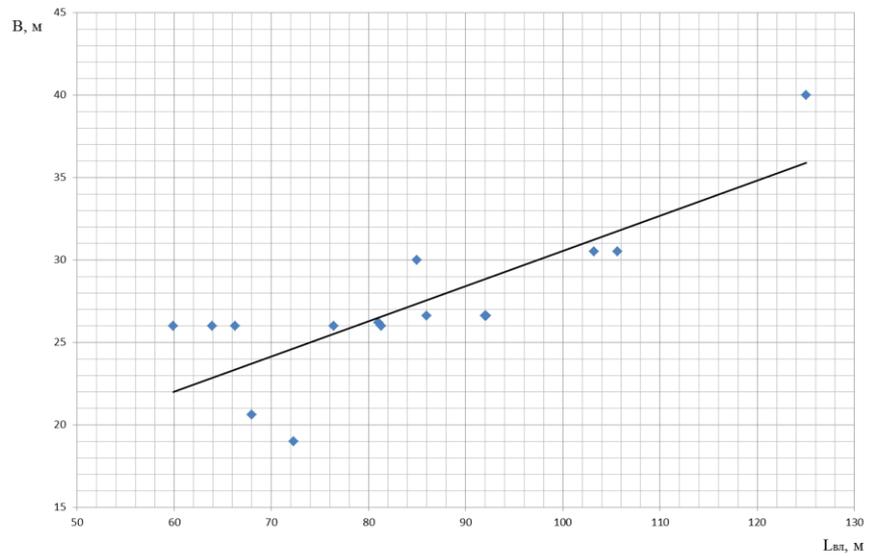


Рис. 5. Зависимость  $B - L_{вл}$

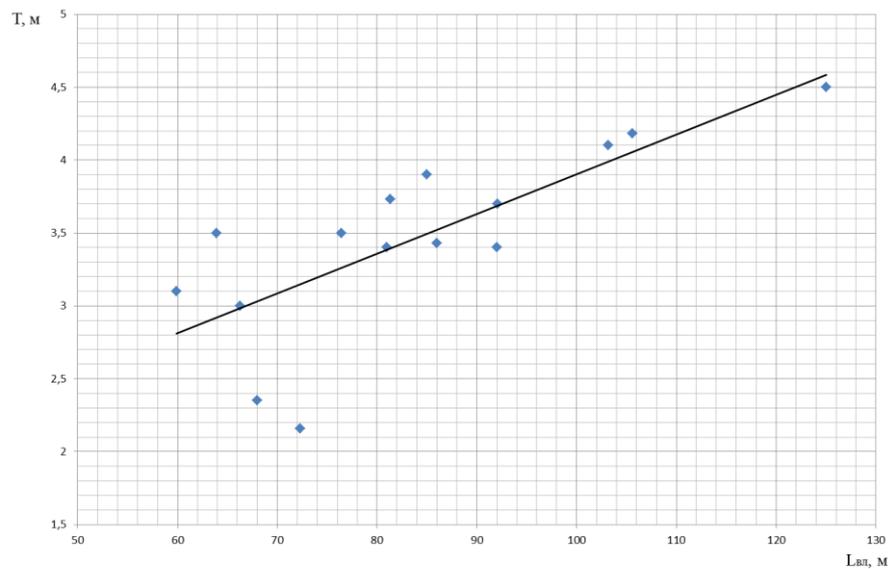


Рис. 6. Зависимость  $T - L_{вл}$

Путем аппроксимации полученные зависимости можно описать линейными уравнениями, где в качестве независимой переменной будет выступать длина по ватерлинии

$$L_{вл} = 0,0374DW + 61,296 \quad (2)$$

$$B = 0,2135L_{вл} + 9,2061 \quad (3)$$

$$T = 0,0273L_{вл} + 1,1754 \quad (4)$$

$$n_{насс} = 13,186L_{вл} - 250,75 \quad (5)$$

Таким образом, полученные эмпирические формулы (2–5) могут быть использованы для решения уравнения нагрузки и плавучести в первом приближении и определения основных проектных характеристик скоростных катамаранов (СК), т.е. послужить первым шагом для решения оптимизационной задачи верхнего уровня по проектированию скоростного пассажирского катамарана.

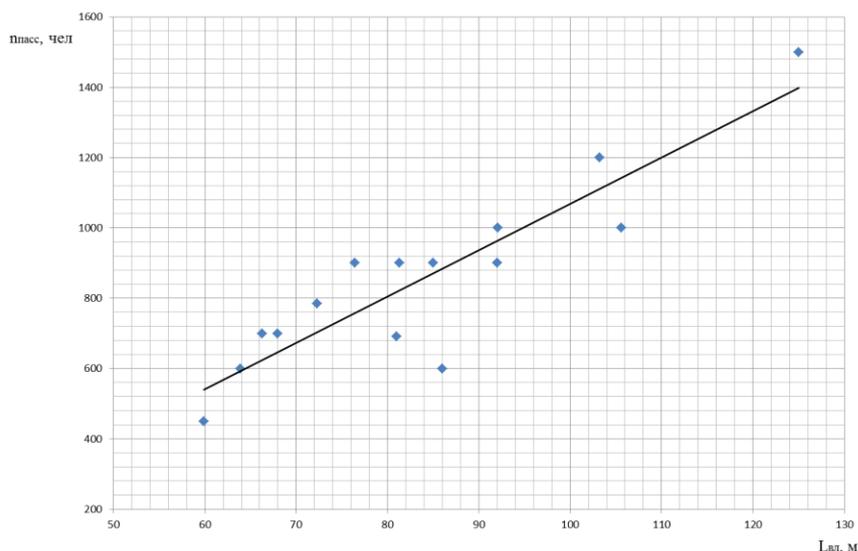


Рис. 7. Зависимость  $p_{\text{пасс}}-L_{\text{вл}}$

Наряду с этим следует заметить, что для принятия решения относительно пассажироместимости будущего судна требуется подробный анализ условий навигации, величины пассажиропотока на конкретной линии, на которых планируется использовать судно, с учётом особенностей географии и экономического развития региона, а также влияния на эти процессы конкурирующих транспортных компаний.

### 3. Заключение

В данной статье показаны статистические исследования, которые позволяют сформулировать принципы проектного анализа на начальных этапах проектирования пассажирских катамаранов, а также зависимости для обоснования выбора главных, размерений, архитектурно-компоновочного типа, обводов, ходкости, энергетической установки и других свойств, последовательно обосновываемых на различных этапах создания проектной документации. Полученные результаты также могут послужить основанием для разработки и практического внедрения методики анализа и обоснования главных размерений и проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов.

#### Список литературы:

1. Смирнов М.А. Скоростные пассажирские суда: транспортные, технические и эксплуатационные аспекты/М.А. Смирнов//Морской вестник. 2019. – № 4 (72) – С. 108–114
2. Соколов В.П. Проектные особенности скоростных катамаранов /В.П. Соколов, А.А. Даняев, А.П. Ермилкин, В.Г. Трубников // Тезисы докладов конференции «Моринтех – 99», Спб. НИЦ-Моринтех – С. 53–54.
3. Сахновский Б.М. Экспериментальное исследование ходкости традиционных и «гибридных» скоростных катамаранов / Б.М. Сахновский, Э.Б. Сахновский // Современные проблемы кораблестроения. Труды НГТУ. – 2005. – Т. 46. – С. 30–39.

4. Соколов В.П. Новые подходы к концепции гидродинамического проектирования надводных кораблей / В.П. Соколов, В.А. Дубровский, В.Н. Половинкин // Сборник докладов конференции «Моринтех-2003», СПб, НИЦ «Моринтех», 2003 – С. 263–269.
5. <http://www.incat.com.au/vessel-progress/current-fleet> (дата обращения: 18.05.2020).
6. <http://www.janes.com> (дата обращения: 18.05.2020).
7. <http://www.austal.com/ship-search> (дата обращения: 18.05.2020).
8. Пашин В.М. Оптимизация судов. / В.М. Пашин – Л.: Судостроение, 1983 – 296 с.
9. Царев Б.А. Критерии эффективности скоростных судов / Материалы научно-технической конференции по проектированию скоростных судов 1986 и 1988 годов. Горький, НТО им. Акад. А.Н. Крылова – 1990 – С. 32–34.
10. Chizhiumov, Sergey & N.A., Taranukha.. Design of high-speed vessels experiencing impact shocks in waves, 2004
11. Lyakhovitsky A.G. Shallow Water and Supercritical Ships. Backbone Publishing Co., Fair Lawn, NJ, USA, 2007. – 277 p.
12. Царев Б. А., Лицис А.В. Формирование алгоритмов оптимизации скоростных судов /Материалы научно-техн. Конфер по проектир. Скоростных судов 1986 и 1988 годов. Горький, НТО им. Акад. А.Н. Крылова – 1990. – С. 35–38.
13. Царев Б.А. Оптимизационное проектирование скоростных судов/ Б.А. Царев. – Л.: ЛКИ, 1988. – 102 с.
14. Матюков Э.Б. О выборе величины запаса водоизмещения скоростных судов /Матюков Э.Б., Любимов В.И. // Труды ГИИВТ: Вопросы проектирования и обеспечения прочности судов внутреннего плавания. – 1983. – №198. – С. 168–174.
15. Чупайло В.Л. Определение основных характеристик малых скоростных судов в начальной стадии проектирования / Чупайло В.Л., Чупайло И.Л. // Труды ЛКИ: Оптимизация проектируемых судов. – 1985. – №4(242). – С. 103–106.

## **THE RATIONAL MAIN DIMENSIONS IN THE DESIGN OF HIGH-SPEED PASSENGER CATAMARANS CHOICE JUSTIFICATION**

**Sergey S. Metelitsa,**

*Nizhny Novgorod state Technical University named after R. E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The article considers the passenger transport features by high-speed vessels, shows the high-speed passenger catamarans share from the total number of passenger vessels under construction. The most common layout solutions brief overview used in newly built passenger catamarans design is given. Statistical data on the high-speed passenger ferries design characteristics are provided. Based on these data, a range of main dimensions and design characteristics related to this type of vessel is formulated. Recommendations are given for using the obtained empirical dependencies in the high-speed passenger catamarans designing process.*

*Keywords: high-speed catamarans, main dimensions, optimization, layout options, passenger capacity.*

### **References:**

1. Smirnov M. A. high-Speed passenger vessels: transport, technical and operational aspects/M. A. Smirnov//Marine Bulletin. 2019. – № 4 (72) – P. 108-114
2. Sokolov V. P. Design features of high-speed catamarans /V. P. Sokolov, A. A. Danyaev, A. p. Ermilkin, V. G. Trubnikov // Abstracts of the conference «Morintech – 99», St. Petersburg, SIC-Morintech-P. 53-54.
3. Sakhnovsky, B. M. Experimental study of the speed of traditional and «hybrid» speed catamarans / B. M. Sakhnovsky, E. B. Sakhnovsky // Modern problems of shipbuilding. Trudy NSTU. – 2005. – Vol. 46. – P. 30-39.

4. Sokolov V. P. New approaches to the concept of hydrodynamic design of surface ships / V. P. Sokolov, V. A. Dubrovsky, V. N. Polovinkin // Collection of reports of the conference «Morintech-2003», St. Petersburg, SIC «Morintech», 2003 – P. 263-269.
5. <http://www.incat.com.au/vessel-progress/current-fleet> (accessed 18.05.2020).
6. <http://www.janes.com> (accessed: 18.05.2020).
7. <http://www.austal.com/ship-search> (accessed: 18.05.2020).
8. Pashin V. M. Optimization of vessels. / V. M. Pashin – L.: Shipbuilding, 1983-296s.
9. Tsarev B. A. Criteria for the effectiveness of high-speed vessels / Materials of the scientific and technical conference on the design of high-speed vessels in 1986 and 1988. Gorky, NTO im. Akad. A. N. Krylova-1990-P. 32-34.
10. Chizhiumov, Sergey & N.A., Taranukha.. Design of high-speed vessels experiencing impact shocks in waves, 2004
11. Lyakhovitsky A.G. Shallow Water and Supercritical Ships. Backbone Publishing Co., Fair Lawn, NJ, USA, 2007 – 277p.
12. Tsarev B. A., litsis A.V. Formation of algorithms for optimization of high-speed vessels / Materials of scientific and technical research. Conference on engineered. High-speed vessels of 1986 and 1988. Gorky, NTO im. Akad. A. N. Krylova-1990-P. 35-38.
13. Tsarev B. A. Optimization design of high-speed vessels/ B. A. Tsarev. – L.: LKI, 1988. – 102 p.
14. Matyukov E. B. on the choice of the size of the water displacement reserve of high-speed vessels / Matyukov E. B., Lyubimov V. I. // Proceedings of the GIIVT: Issues of designing and ensuring the strength of inland navigation vessels. – 1983. – №198. – P. 168-174.
15. Chupaylo V. L. Determination of the main characteristics of small high-speed vessels in the initial design stage / Chupaylo V. L., Chupaylo I. L.//Works of LKI: Optimization of designed vessels. – 1985. – №4(242). – P. 103-106.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Метелица Сергей Сергеевич**, аспирант,  
Нижегородский Государственный Технический  
Университет им. Р.Е. Алексеева» (ФГБОУ ВО  
«НГТУ им. Р.Е. Алексеева»),  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24  
e-mail: meteserg@yandex.ru

**Sergey S. Metelitsa**, post-graduate student,  
Nizhny Novgorod state Technical University  
named after R. E. Alekseev (NSTU NAMED  
after R.E. Alekseev»),  
24, Minina st., Nizhny Novgorod, 603950,

Статья поступила в редакцию 29.04.2020 г.

УДК 629.512

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.99>

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПРОКИДЫВАНИЯ ВСПЛЫВАЮЩЕГО БУЯ НА СТАЦИОНАРНОМ ТЕЧЕНИИ В СОСТАВЕ СРЕДНЕЧАСТОТНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЁ ХАРАКТЕРИСТИК

**М.Н. Мозговая**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**С.Н. Бычков**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**К.А. Костылев**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1061-9192>

*Аннотация. В рамках акустических исследований мелкого моря возникла задача создания сервисного среднечастотного гидроакустического комплекса (далее ССГК). Данный комплекс предназначен для обеспечения информационного взаимодействия надводного плавсредства с донным оборудованием через гидроакустический канал связи, а также обеспечения поиска и подъема донного оборудования на поверхность и представляет собой набор аппаратуры, устанавливаемой, в том числе, на всплывающем бую. В настоящей работе рассматривается методика расчета остойчивости указанного буя на больших углах крена, а также его пространственная конфигурация на стационарном течении с учетом требований по расположению аппаратуры. Спроектированный буй остойчив и отвечает основным критериям технического задания.*

*Ключевые слова: остойчивость, плавучесть, плечо статической остойчивости, кренящий момент, восстанавливающий момент, метацентрическая высота, динамическая остойчивость, остойчивость на больших углах крена, гидроакустическая станция, трос нулевой плавучести, стационарное течение.*

### Введение

В состав ССГК входят: бортовая часть (бортовая аппаратура управления) и донная часть (гидроакустический модем-размыкатель, всплывающий маяк).

Гидроакустический модем-размыкатель – это устройство, предназначенное для поднятия на поверхность подводного оборудования (в данном случае – всплывающий маяк) за счет отсоединения контейнера с тросом нулевой плавучести.

Разработанный всплывающий маяк (рис. 1) предназначен для определения местоположения донной гидроакустической станции, находящейся в подводном положении, посредством гидроакустических сигналов связи [1]. Всплывающий маяк состоит из следующих элементов: корпус маяка с электронной аппаратурой; опорная труба; несущая конструкция; кухтыли глубоководные с положительной плавучестью 150Н в количестве 3 шт. Назначение маяка – маркировка положения устройства на поверхности воды в темное время суток. Поиск осуществляется оптико-электронными средствами визуального контроля по проблесковому маячку.

К всплывающему бую предъявляются следующие основные требования: обеспечение положительной плавучести согласно ТЗ, отсутствие абсорбции морской воды,

устойчивость конструкции к гидростатическому давлению, стойкость к коррозии, а также специфичные требования по ориентации (см. рис. 1).

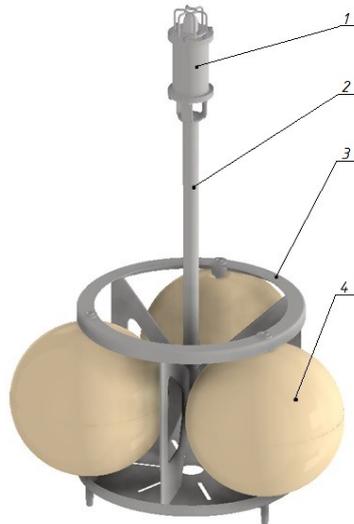


Рис. 1. Система всплывающего буя:  
1 – корпус маяка с электронной аппаратурой; 2 – опорная труба;  
3 – несущая конструкция; 4 – кухтыль 150Н глубоководный

### 1. Исследование остойчивости всплывающего буя

Традиционно, при проектировании всплывающего буя необходимо выполнить только расчет плавучести [2]. Однако для обеспечения безопасности и выполнения требований по ориентации устройства и расположению аппаратуры также возникла необходимость в детальном исследовании остойчивости.

Под остойчивостью [3] понимается способность плавучего средства возвращаться в исходное положение равновесия, после прекращения действия сил, вызывающие его отклонения.

В упрощенном изложении задача об остойчивости всплывающего маяка была сведена к её рассмотрению на больших углах крена буя. При таких углах площадь действующей ватерлинии буя и ее момент инерции значительно изменяются. Следовательно, величина метацентрического радиуса будет меняться во время наклонения, а также изменяется положение метacentра [4]. Исходя из этих факторов, метацентрическая высота уже не может служить надежным критерием остойчивости буя (как в случае рассмотрения начальной остойчивости). Критерием статической остойчивости при больших углах крена буя может быть восстанавливающий момент [5], который и был принят таковым в рамках настоящего исследования. Он представляет собой разность моментов силы плавучести  $\gamma V$  и силы веса  $D$  относительно первоначального положения центра величины  $C$  [6]:

$$M_s = D \cdot (l_\phi - l_s) \quad (1)$$

Плечо статической остойчивости  $l$  [7] определяется длиной перпендикуляра, опущенного из центра тяжести (ЦТ) всплывающего маяка на линию действия силы поддержания его в наклонном положении [6]:

$$l = l_\phi - l_s \quad (2)$$

где  $l_\phi = r(\theta) \cdot \sin \theta$  – плечо остойчивости формы (длина перпендикуляра, опущенного

из центра величины (ЦВ) всплывающего маяка, находящегося в прямом положении, на линию действия силы поддержания при наличии крена), м;

$$l_{\theta} = a \cdot \sin \theta - \text{плечо силы тяжести, м.}$$

Условие равновесия маяка в наклонном положении состоит в равенстве статического кренящего (дифференцирующего) и восстанавливающего моментов [6]:

$$M_{кр} = M_{\theta} \quad (3)$$

Рассматриваемые внешние моменты, наклоняющие разрабатываемый маяк, совершают работу, которую должна уравновесить работа восстанавливающих сил, т.е. в расчетах рассматривается не только статическая остойчивость, но и динамическая.

При крене буя его центр величины перемещается в сторону наклона. Для определения центра величины находим бесконечно малые перемещения Центра величины (ЦВ) (рис. 2) [8]:

$$\begin{cases} dy = C_{\theta} C_{\theta_1} \cdot \cos \theta = r_{\theta} \cdot d\theta \cdot \cos \theta \\ dz = C_{\theta} C_{\theta_1} \cdot \sin \theta = r_{\theta} \cdot d\theta \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

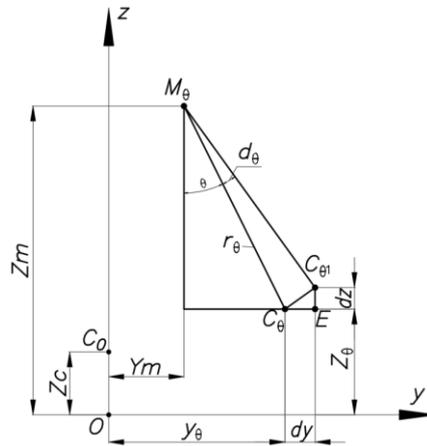


Рис. 2. Определение координат метacentра

Интегрируя координаты ЦВ при крене по формуле (4), получаем следующие выражения [8]:

$$\begin{cases} y_{\theta} = \int_0^{\theta} r_{\varphi} \cos \varphi d\varphi \\ z_{\theta} = z_c + \int_0^{\theta} r_{\varphi} \sin \varphi d\varphi \end{cases} \quad (5)$$

где  $r_{\varphi}$  – метacentрический радиус всплывающего буя с установленным проблесковым маяком, наклоненного на угол  $\varphi$ , равный [9]:

$$r_{\varphi} = \frac{I_{\varphi}}{V} \quad (6)$$

$I_{\varphi}$  – поперечный момент инерции площади наклонной ватерлинии указанного буя относительно его центральной продольной оси;

$V$  – водоизмещение.

Для любого малого наклона (крена, дифферента), согласно теореме Эйлера, объем погруженной части буй не изменится.

Координаты метacentра  $M_\theta$  при крене  $\theta$ , представляющего собой центр кривизны кривой центров величины в точке  $C_\theta$  (используя рис. 2) [8]:

$$\begin{cases} y_m = y_\theta - r_\theta \sin \theta \\ z_m = z_\theta + r_\theta \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

Для оценки характеристик остойчивости необходимо построить диаграмму статической остойчивости (далее ДСО) (рис. 3).

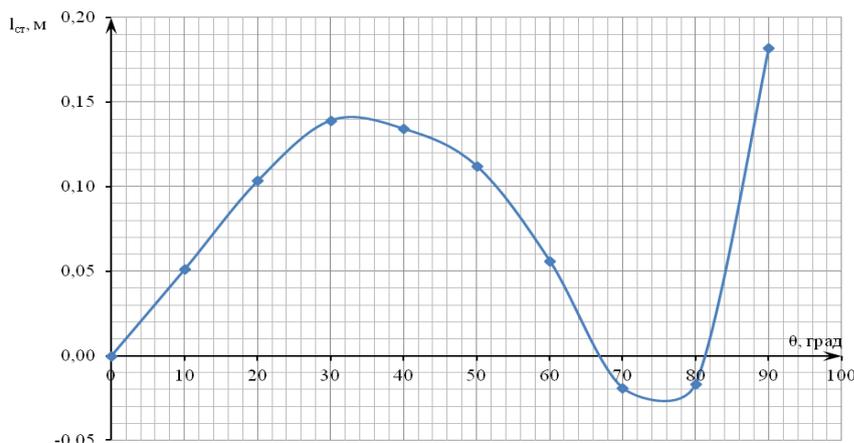


Рис. 3. Диаграмма статической остойчивости всплывающего буй (графическая зависимость плеча восстанавливающего момента от угла крена)

Как известно, восходящая часть кривой ДСО соответствует устойчивому положению равновесия всплывающего буй, а нисходящая – неустойчивому. Отметим на диаграмме несколько ключевых точек:

- точка  $O$  (начало координат): положение устойчивого равновесия буй;
- точка  $\theta_{\max 1} = 33,5^\circ$ : угол максимального значения восстанавливающего момента (рассматривается положение системы всплывающего буй согласно рис. 1), поскольку плечо остойчивости также принимает максимальное значение;
- точка  $\theta_3 = 66,5^\circ$ : определяет угол заката ДСО (т.е. при угле крена большем или равном  $66,5^\circ$  маяк потеряет устойчивость и опрокинется).

При дальнейшем анализе ДСО видно, что при угле наклона большем или равном  $81,5^\circ$  маяк вернется в устойчивое положение, но проблесковый маячок будет под водой. Такое положение недопустимо, следовательно, максимальный восстанавливающий момент принимается при  $\theta_{\max 1} = 33,5^\circ$ .

На рассматриваемый буй действует не только статический кренящий момент, но и динамический (например, при качке или шквале ветра). Диаграмма динамической остойчивости (далее ДДО) представлена на рис. 4.

Анализируя ДДО, до угла  $25^\circ$  (угол статического равновесия) конструкция наклоняется с ускорением, а после него, продолжает наклоняться по инерции. Динамическое равновесие наступает при условии равенства работ кренящего и восстанавливающего моментов – при угле  $66,5^\circ$ .

На основании диаграмм (рис. 3 и рис. 4) можно утверждать, что полученные максимальные статические и динамические моменты не превышают восстанавливающего момента. Следовательно, разрабатываемая конструкция является устойчивой.

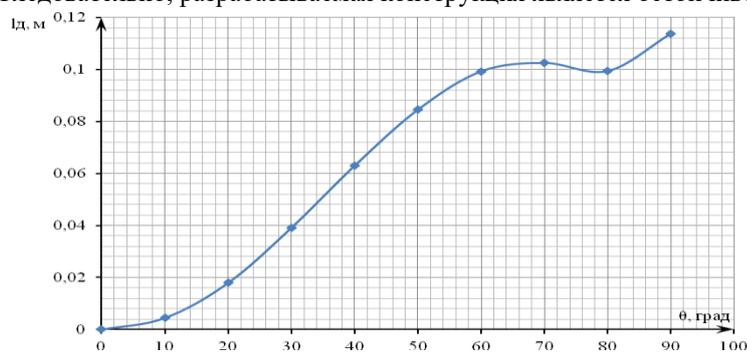


Рис. 4. Диаграмма динамической устойчивости всплывающего буя

Практическая проверка полученных при расчете диаграмм осуществлялась при моделировании буя в CAD/CAM системе – Autodesk Inventor Professional 2020, а также путем натурных испытаний изготовленной в соответствии с расчетами аппаратуры.

## 2. Всплытие системы «буй-полезная нагрузка» на поверхность

При всплытии буя необходимым является условие ориентации на поверхности воды согласно рис. 1. Определение новых плеч устойчивости при добавлении груза (для уравновешивания конструкции) осуществляется с помощью формулы [9]:

$$l_1 = l + \frac{m}{m + D} \left[ \left( T + \frac{m}{200q} - z_p \right) \sin \theta - l \right] \quad (8)$$

где  $l$  – плечо статической устойчивости при первоначальном положении ЦТ конструкции;

$m$  – масса добавочного груза;

$D$  – водоизмещение без добавочного груза;

$T$  – первоначальная осадка;

$z_p$  – отстояние ЦТ груза от нижней панели системы всплывающего буя;

$q$  – число тонн на 1 см осадки.

При закреплении противовеса увеличивается устойчивость всей конструкции. На рис. 5 представлено изменение ДСО при добавлении груза.

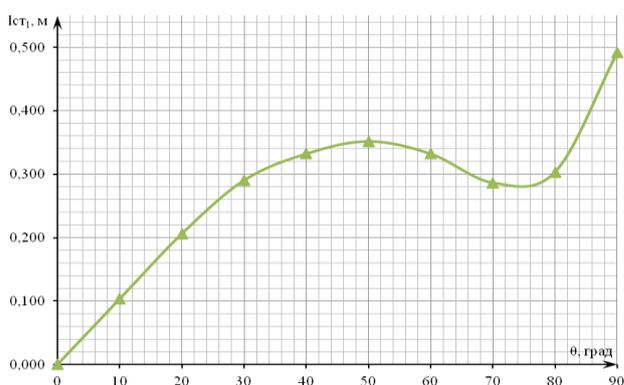


Рис. 5 ДСО с учетом добавочного груза (противовеса)

Исходя из рис. 5, делаем вывод, что система всплывающего буйа устойчива за счет добавочного груза, который противодействует опрокидыванию.

### 3. Определение пространственной конфигурации всплывающей системы на стационарном течении

Для обеспечения равновесия буйа, после всплытия, необходимо найти минимальную длину удерживающего его троса, а расстояние, на которое переместится буй под действием постоянного течения и силы натяжения троса.

Ниже приведены допущения, используемые при анализе системы всплывающего буйа.

Поскольку рассматривается система при действии стационарного течения, то пренебрегаем следующими параметрами [10]:

1. Трос не растягивается при нагрузке (т.е. пренебрегаем относительным удлинением);
2. Направление течения не имеет вертикальной составляющей (рассматривается только нормальная составляющая сопротивления), трос и вектор течения находятся в одной плоскости;
3. Скорость течения постоянна с изменением глубины. (При расчете принята скорость течения – 1 уз).

Применяемый трос обладает нулевой плавучестью, следовательно, пренебрегаем силой тяжести и касательной составляющей сопротивления. В дополнение к этому, трос обладает идеальной гибкостью, т.е. не передает изгибающих моментов.

При исследовании учитываются силы плавучести, гидродинамическое сопротивление и натяжение троса (рис. 6).

Сила сопротивления элементарного участка троса диаметром  $d$  и длиной  $ds$  (см. рис. 6, как отмечалось ранее, рассматривается только нормальная составляющая сопротивления) может быть вычислена по формуле [10]:

$$Dds = \frac{1}{2} \rho C_n d V_n^2 ds, \quad (9)$$

где  $C_n$  – коэффициент нормального сопротивления;

$\rho$  – плотность морской воды;

$V_n$  – нормальная составляющая скорости течения.

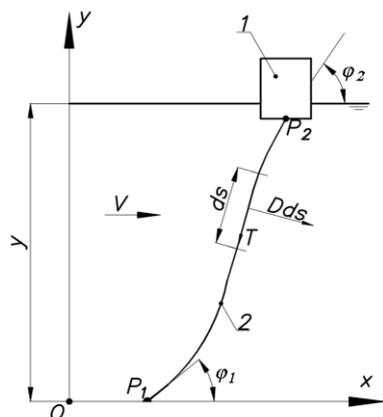


Рис. 6. Схема системы всплывающего буйа: 1 – всплывающий буй; 2 – трос;  $ds$  – длина элементарного участка троса;  $Dds$  – нормальная составляющая сопротивления;  $T$  – натяжение троса;  $\varphi_1$  – угол между осью троса и поверхностью дна;  $\varphi_2$  – угол между осью троса и поверхностью воды;  $y$  – глубина погружения)

Горизонтальную составляющую натяжения у буя находим из нижеприведенной формулы [10]:

$$Td\varphi = Dds \quad (10)$$

Если известно натяжение в какой-либо точке троса, то его можно определить и для любой другой его точки [10]:

$$T = T_0 = const \quad (11)$$

Из формул (9) и (10) получаем:

$$ds = \frac{T_0 d\varphi}{R \sin^2 \varphi} \quad (12)$$

Горизонтальная и вертикальная проекции элементарного участка троса [10]:

$$dx = ds \cos \varphi = \frac{T_0 \cdot \cos \varphi}{R \sin^2 \varphi} d\varphi \quad (13)$$

$$dy = ds \sin \varphi = \frac{T_0}{R \sin \varphi} d\varphi \quad (14)$$

Интегралы дифференциальных уравнений (12), (13) и (14), вычисленные от точки крепления троса на дне  $P_1(\varphi)$  до точки крепления троса на буре  $P_2(\varphi)$ , дают длину троса, а также горизонтальное и вертикальное расстояния между этими точками.

Длина троса определяется по формуле [10]:

$$s = \frac{T_0}{R} [ctg \varphi_1 - ctg \varphi_2] \quad (15)$$

Координаты сдвига буя при действии стационарного течения в 1 узел рассчитываются, исходя из следующих зависимостей [10]:

$$\begin{aligned} x &= -\frac{T_0}{R} [\cos ec \varphi_2 - \cos ec \varphi_1] \\ y &= \frac{T_0}{R} \left[ \ln \left( tg \frac{\varphi_2}{2} \right) - \ln \left( tg \frac{\varphi_1}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\varphi_1$  – угол между поверхностью дна и тросом;

$\varphi_2$  – угол между поверхностью воды и креплением троса у основания маяка;

$T_0$  – натяжение троса;

$R$  – гидродинамическое сопротивление единицы его длины.

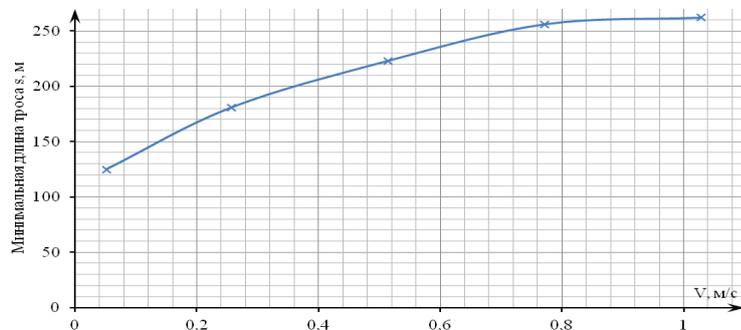


Рис. 7. Зависимость минимальной длины троса  $s$  от скорости стационарного течения  $V$

На рис. 7 приведен результат расчета зависимости минимальной длины троса от скорости стационарного течения.

#### 4. Результаты проектирования и исследования

Характеристики и размеры спроектированного буя приведены в табл. 1. Изготовленные элементы конструкции системы всплывающего буя показаны на рис. 8.

Таблица 1

Основные характеристики и размеры буя

Характеристики	Размерность	Величины
Габаритная высота буя, $H_f$	м	1,17
Габаритный диаметр буя, $D$	м	0,835
Масса системы всплывающего буя, $M$	кг	48
Осадка, $T$	м	0,17
Аппликата центра тяжести конструкции без учета добавочного груза, $Z_g$	м	0,218
Аппликата центра величины конструкции без учета добавочного груза, $Z_c$	м	0,143
Момент инерции площади ватерлинии, $I_x$	м <sup>4</sup>	0,0105
Метацентрический радиус, $r$	м	0,409
Метацентрическая высота, $h$	м	0,334
Положительная плавучесть	кгс	30,6
Эксплуатационная глубина буя в подводном положении, $h_{\text{эспл}}$	м	250
Материал конструкции	-	сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-75



а)



б)

Рис. 8. Изготовленные элементы конструкции системы всплывающего буя: а – несущая конструкция с глубоководными кухтылями 150Н; б – несущая конструкция

### **Заключение**

Полученные результаты позволили утвердить разработанную конструкцию для применения в научно-исследовательских работах в качестве составной части программно-аппаратного исследовательского комплекса.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН по теме «Разработка физических основ акустических систем нового поколения» (Соглашение № 075-03-2020-664 (внутренний номер 075-ГЗ/Ц3541/030)).

### **Список литературы:**

1. Urick R.J. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill, 1967 – 342 p.
2. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Остойчивость понтонов в зумпфах угольных разрезов на больших углах крена// Вестник КузГТУ.2013. №4. –с. 32–37.
3. Rawson K.J. Stability. Basic Ship Theory / K.J. Rawson, E.C. Tupper. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2001. – 784p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-5398-5.X5000-6
4. Сизов В.Г. Теория корабля: Учебн. пособие. – Одесса: Феникс, 2008. – 459 с.
5. Biran A., Ship hydrostatics and stability /1st ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford 2003, – 344 p.
6. Борисов Р.В. Статика корабля / Р.В. Борисов, В.В. Луговский, Б.М. Мирохин, В.В. Рождественский. – СПб. : Судостроение, 2005. – 256 с.
7. Megel, J. Metacenter and ship stability / J. Megel, J. Kliava / American Journal of Physics. – 2010. – Vol. 78, Issue 7. – p. 738-747. DOI: 10.1119/1.3285975
8. Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля: в 2-х т. / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1976 – 1976. Т. 1 : Статика корабля. – 1976. – 336 с.
9. Бекенский Б.В. Практические расчеты мореходных качеств судна/ Б.В. Бекенский. – М. : Транспорт, 1974. – 264 с.
10. Berteaux H.O. Buoy Engineering. John Wiley and Sons, 1976 – 334p.

## **THE DEPLOYING BUOYING SYSTEM DESIGN IN A STATIONARY FLOW AS A PART OF A MEDIUM-FREQUENCY HYDRO-ACOUSTIC COMPLEX AND ITS CHARACTERISTICS RESEARCH**

**Maria N. Mozgovaya,**

*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
Nizhny Novgorod, Russia*

**Sergey N. Bychkov,**

*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
Nizhny Novgorod, Russia*

**Konstantin A. Kostylev,**

*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The present study provides a designing the floating buoy system. The floating buoy is designed to determine the mid-frequency hydroacoustic set location, located in the underwater position, using sonar communication signals. The approach considers the stability at large angles of inclination analysis. For this reason, the main stability criteria is recovery moment. As a result, the following diagrams are plotted – statical stability curve and dynamical stability curve to estimate the research. Moreover, the study includes defining spatial configuration at steady flow. It is also important to mention the basic requirements for the construction of the buoy are ensuring positive buoyancy according to the terms of reference, lack of sea water absorption, sustainability to hydrostatic pressure and corrosion resistance. The study reveals designing the construction, which is able to prevent capsizing. Conse-*

quently, the buoy has positive stability, sufficient recovery moment enable to return the structure to its original position and meet the claimed buoyancy requirements.

The work was performed within the framework Of the state task of the IAP RAS on the topic «Development of the physical foundations of new generation acoustic systems» (Agreement no. 075-03-2020-664 (internal number 075-GZ / C3541 / 030)).

Keywords: *stability, buoyancy, righting arm, stability moment, heeling moment, dynamical stability, metacentric height, stability at large angles of inclination, hydroacoustic station, neutrally buoyant cable, constant current.*

#### References:

1. Urick R.J. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill, 1967. 342 p.
2. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. «Stability of pontoons in sumps of coal mines at large angles of inclination» Bulletin of KuzGTU. -4 (2013): 32–37.
3. Rawson K.J. Tupper E.C. Stability. Basic Ship Theory. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2001. – 784 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-5398-5.X5000-6
4. Sizov V.G. The theory of the ship: Textbook. allowance. Odessa: Phoenix, 2008 . 459 p.
5. Biran A., Ship hydrostatics and stability. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford 2003, 344p.
6. Borisov, R.V. Static of the ship. SPb: Shipbuilding, 2005. 256 p.
7. Megel, J. «Metacenter and ship stability». American Journal of Physics. 78 (2010): 738-747. DOI: 10.1119/1.3285975
8. Blagoveshchensky, S. N. Handbook on the statics and dynamics of the ship: in 2 volumes. L.: Shipbuilding, V. 1: Statics of the ship. 1976. 336 p.
9. Bekensky, B.V. Practical calculations of seaworthiness of a vessel. M.:Transport, 1974. 264 p.
10. Berteaux H.O. Buoy Engineering. John Wiley and Sons, 1976. 334p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Мозговая Мария Николаевна**, старший лаборант-исследователь отдела физической акустики, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120, ул. Ульянова, 46, e-mail: mariya@ipfran.ru

**Бычков Сергей Николаевич**, ведущий инженер отдела физической акустики, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120, ул. Ульянова, 46, e-mail: bychkov@ipfran.ru

**Костылев Константин Андреевич**, к.т.н, зав.сектором гидроакустического инжиниринга, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120, ул. Ульянова, 46, e-mail: kostylev@ipfran.ru

**Maria N. Mozgovaya**, senior research assistant of the Department of Physical Acoustics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950

**Sergey N. Bychkov**, principal engineer of the Department of Physical Acoustics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950

**Konstantin A. Kostylev**, Candidate of Technical Sciences, Head of Hydroacoustic Engineering Sector, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950

Статья поступила в редакцию 27.07.2020 г.

УДК 556.044

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.100>

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПЛЕНКАХ НА ВОДЕ**

**А.А. Мольков**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия  
Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8550-2418>*

**С.А. Ермаков**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия  
Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**И.А. Сергиевская**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия  
Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**Т.Н. Лазарева**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**Г.В. Лещёв**

*Институт прикладной физики Российской академии наук,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация. Недавно в рамках лабораторного эксперимента был впервые продемонстрирован эффект генерации в воздухе акустических импульсов звуковых частот («треск»), при облучении пленки на поверхности воды непрерывным лазерным излучением с длиной волны 10,5 мкм, в то время как для чистой воды треск не регистрировался. Наличие пленки существенно меняло условия формирования областей локального нагрева в воде и, как результат, излучения акустических волн. Характеристики звука были предварительно исследованы в зависимости от температуры воды, толщины пленки и ее вещества, интенсивности излучения. Однако недостаточная повторяемость эффекта в ряде экспериментов стимулировала дополнительные исследования, наблюдаемого оптоакустического эффекта для получения наглядной информации о процессах, происходящих в зоне облучения с использованием видеосъемки. Результаты этого исследования на примере лабораторного и натурального эксперимента представлены в настоящей работе.*

*Ключевые слова: оптоакустика, оптоакустический эффект, пленки ПАВ, слики, макросъемка, скоростная съемка*

### **Введение**

Разработка методов дистанционного мониторинга поверхностных загрязнений водоемов составляет значительную часть океанологических исследований. Одним из индикаторов антропогенных загрязнений природных водоемов являются слики, в подавляющем большинстве связанные с пленками поверхностно-активных веществ (ПАВ) на водной поверхности [1]. Детектирование сликов, в основном, осуществляется средствами дистанционного зондирования оптического и радиодиапазонов, позво-

ляя получать предварительную информацию об их характеристиках [2]. Однако при необходимости получить более детальную или количественную информацию, существующие методы испытывают трудности [3, 4]. Это, в свою очередь, постоянно подталкивает исследователей к разработке новых методов диагностики пленок ПАВ на морской поверхности (см., например, [5–8]). Среди таковых особенно можно выделить направление, сформированное на стыке двух областей – оптики и акустики. Оптоакустические методы активно используются в дефектоскопии и медицине при диагностике мягких тканей [9, 10]. Применительно к пленкам на воде подобные исследования тоже проводились [11–14], но успешная практическая реализация оптоакустического подхода в океанологии встречается лишь в небольшом количестве работ. В [15] лазерный ультразвуковой метод базировался на идее теплового возбуждения мощным ИК-лазером звуковой волны, распространяющейся вглубь толстой пленки до ее нижней границы, где происходит ее частичное отражение и последующее распространение в обратном направлении. При достижении верхней границы пленки звуковая волна создает локальное возмущение, регистрируемое вторым лазером. В работе [16] авторы использовали импульсный лазер с длиной волны 355 нм для генерации ультразвука и сканирующий лазерный доплеровский виброметр (Laser Doppler Vibrometer – LDV) для регистрации амплитуды и частоты акустических сигналов на поверхности пленки по ее возмущениям. Еще одна вариация метода была предложена в работе [17], где в лабораторном эксперименте с помощью сверхширокополосного ультразвукового гидрофона был зарегистрирован ультразвук, а по его характеристикам были получены оценки толщин нефтяной пленки. Совершенно новый подход был недавно предложен в работе [18], где в рамках лабораторного эксперимента был впервые продемонстрирован эффект генерации в воздухе акустических импульсов, напоминающих треск, воспринимаемый на слух, при облучении пленки на поверхности воды непрерывным лазерным излучением с длиной волны 10,4 мкм, в то время, как для чистой воды треск не регистрировался. В ходе анализа данных были получены как регулярно повторяющиеся, так и сильно изменчивые результаты при сохранении условий проведения эксперимента. Так, например, отсутствовала однозначная связь между интенсивностью треска и толщиной (концентрацией) пленки, а частота следования щелчков оказалась неоднозначной функцией концентрации поверхностной пленки [19]. В связи с необходимостью разрешения сложившейся ситуации было решено провести дополнительные исследования, направленные на визуализацию процессов, протекающих в зоне облучения пленки, методом скоростной макровидеосъемки. Результаты этого исследования представлены в настоящей работе.

### Лабораторный эксперимент

Лабораторный эксперимент проводился в лаборатории ИПФ РАН. На горизонтальной поверхности устанавливалась предварительно протертая спиртом стеклянная кювета размером 258×60×115 мм, заполненная водой до уровня 50 мм. В качестве вещества пленки использовалась уральская нефть. Пленка наносилась калиброванной пипеткой на поверхность воды. Над кюветой размещался источник излучения – 10,5 мкм CO<sub>2</sub> лазер марки CloudRay, мощность которого плавно регулировалась в диапазоне 0–40 Вт. Излучение «заходило» в кювету под прямым углом к поверхности посредством зеркала. Аналоговый микрофон размещался в воздухе вблизи кюветы. Сигнал с него оцифровывался посредством АЦП, после чего проходил спектральную обработку.

Видеосъемка процессов в кювете проводилась с применением камеры Nikon 1 с макрообъективом при скорости съемки 400 кадров в секунду. Фотоаппарат устанавливался на штативе с одной из сторон от кюветы на удалении порядка 300 мм. С зеркальной стороны монтировался полупрозрачный экран, позади которого под наклоном к горизонту устанавливался студийный свет. Таким образом формировалось градиентное освещение.

### Натурный эксперимент

Помимо лабораторных работ, исследование оптоакустического эффекта также проводилось в натуральных условиях, в яхт-клубе «Белая речка» на Горьковском водохранилище. С одной стороны, было важно оценить влияние натуральных условий (волнения, посторонних шумов, собственной пленки на водной поверхности и др.) на возможность регистрации оптоакустического эффекта. С другой стороны, использовать естественное смещение пленки за счет течения в верхнем слое, чтобы в каждый последующий момент времени обеспечить облучение участка пленки, не облученного ранее.

В этих работах использовалась та же техника и та же методика выполнения работ, что и в лабораторном эксперименте, с той лишь разницей, что лазер вывешивался над водной поверхностью с пирса. Расстояние до поверхности регулировалось механически. Пленки создавались путем точечного выливания фиксированного объема вещества вблизи центра зоны облучения. Процесс растекания фиксировался на дополнительную веб-камеру с пирса (рис. 1), что позднее позволяло пересчитать объем вылитого вещества через занимаемую им площадь в толщину пленки в каждый момент времени. В качестве поверхностно-активных веществ использовались экологически безвредные растительное масло и олеиновая кислота.

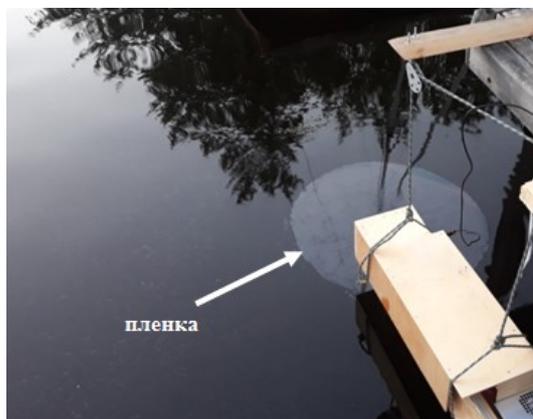


Рис. 1. Фотография постановки натурального эксперимента по регистрации оптоакустического эффекта с пленкой растительного масла на водной поверхности Горьковского водохранилища

### Результаты и их обсуждение

Результаты лабораторных исследований представлены на примере одной из видеозаписей, когда на поверхности воды было создано нефтяное пятно около 15 мм в диаметре и толщиной в несколько долей миллиметра (рис. 2). Это толстая темная пленка, изображение которой на фоне светлой поверхности воды оказалось достаточно контрастным, чтобы в деталях рассмотреть процессы, сопутствующие оптоакустическому эффекту. Процесс начинался с того, что в начальный момент времени ( $t = 0$ ) включался лазер. Через 40 мс зона облучения диаметром около 3 мм (порядка диаметра пучка) приходила в колебательное движение. В данном эксперименте удалось зарегистрировать 3 колебания за счет изменения яркости поверхности, вызванного изменением ее локального уклона. Периоды колебаний были различны: 50 мс; 20 мс; 12 мс. По окончании колебаний, спустя 10 мс, стало заметным высветление зоны облучения, вероятно связанное с уменьшением толщины пленки вследствие прожигания. В момент времени  $t = 139$  мс произошел «взрыв» малой амплитуды, сопровождаемый разрывом пленки, высвобождением пара, расширением области разрыва и формированием расходящейся поверхностной волны (рис. 2–4 и 2–5). Последние два

процесса наблюдались на поверхности в течение 46 мс, после чего картина поверхности не менялась в течение еще 18 мс.

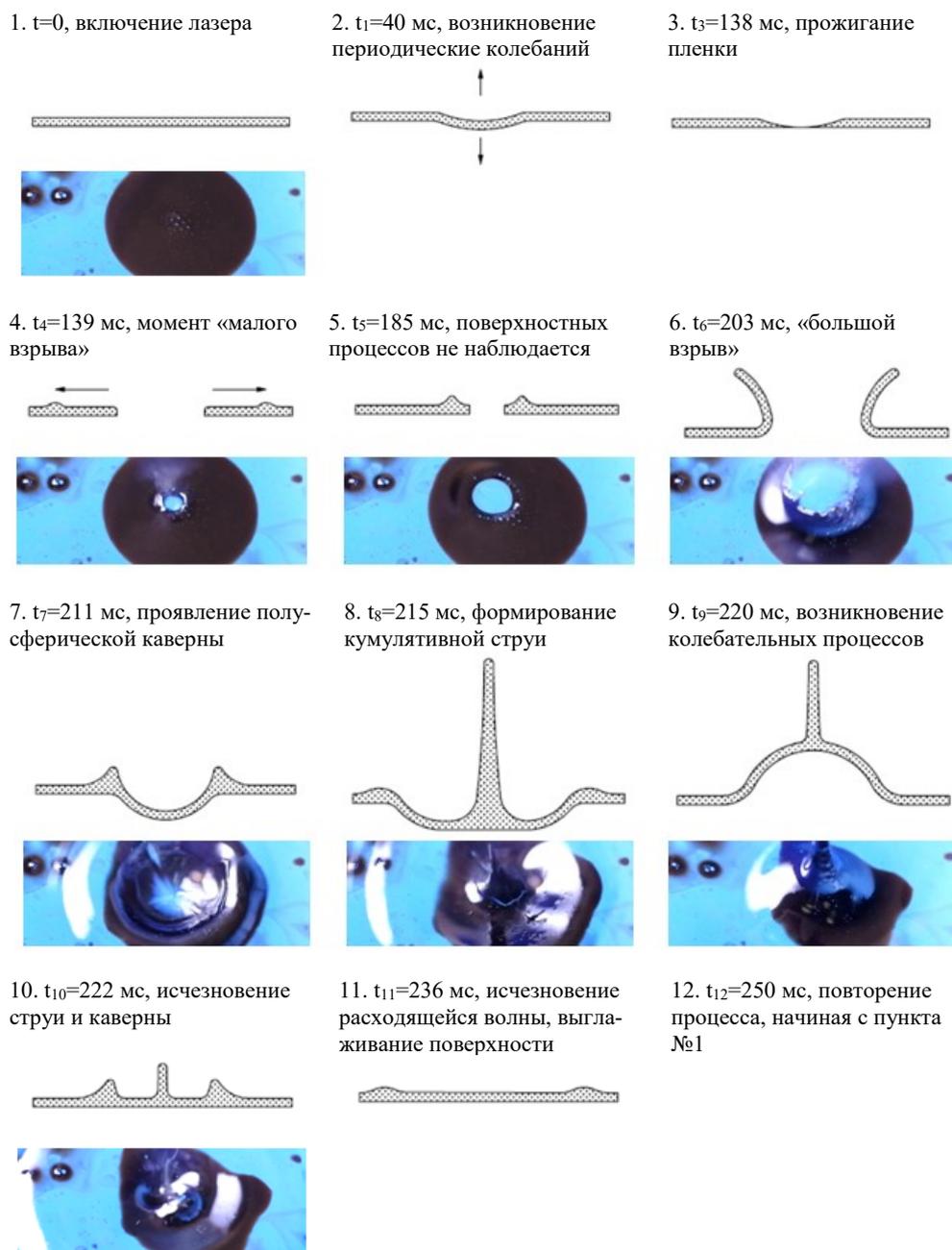


Рис. 2. Визуализация оптоакустического эффекта в толстой нефтяной пленке на водной поверхности

В это время под пленкой за счет интенсивного нагрева формировалась воздушная каверна (см. рис. 3). В момент времени  $t=203$  мс последовал «большой взрыв», сопровождаемый разрывом пленки, выделением пара и выбросом брызг с рваной границы пленки – венца, возвышающегося над поверхностью жидкости (рис. 2–9). Спустя

несколько миллисекунд в области разрыва стала различима полу- сферическая каверна, ко дну которой стекала пленка (рис. 2–10).

В последующие 4 мс времени каверна расширялась, ее дно устремилось вверх с образованием кумулятивной струи, а кромка каверны – сглаженный за счет поверхностного натяжения венец, трансформировался в расходящуюся поверхностную волну (рис. 2–11). Колебания каверны с распадом кумулятивной струи, наблюдаемые в последующие 14 мс, являлись финальным этапом гидродинамических процессов, после чего весь процесс повторялся. Статистический анализ представленного на рис. 2 и других видеорядов, позволил сделать следующие выводы:

1. Установлены два потенциальных источника излучения звуковых волн: «большие» и «малые» взрывы воздушной каверны под пленкой. Процессы, следующие после «большого взрыва» схожи с последствиями от падения капли на невозмущенную поверхность жидкости [20]. «Малые взрывы» напоминают кипение, сопровождаемое выделением пара и мелких брызг.

2. «Малые взрывы» регистрируются в количестве 0-5 штук между «большими взрывами», причем, как правило, они наблюдаются как на дне каверны, так и на пике кумулятивной струи.

3. Если толстая нефтяная пленка относится в сторону от области облучения, то «малые взрывы» практически полностью пропадают и наблюдаются только «большие взрывы» под оставшейся тонкой пленкой (рис. 4).

4. Установлена средняя продолжительность процесса, описанного на рис. 2, равная 0.25 с.

5. Считая, что регулярно наблюдаемыми являются только «большие взрывы» (см. п. 2), предположительно являющиеся основным источником излучения звуковых волн (щелчков), была подсчитана функция распределения количества щелчков в зависимости от частоты их следования (рис. 5) Согласно этой функции, наиболее часты щелчки с периодом следования 0,025 с. Полученный результат согласуется с результатами спектральной обработки аудиозаписей «треска» [18].



Рис. 3. Момент формирования воздушной каверны под пленкой при ее интенсивном облучении (фронтальный разрез).

В натуральных условиях оптоакустический эффект также удалось зарегистрировать при одновременной регистрации его визуального проявления. Все процессы оказались аналогичны тем, что наблюдались в лаборатории, хотя количественные оценки характеристик звука еще не получены до конца. Несмотря на это, проведенный эксперимент позволил получить несколько полезных результатов:

1. Наличие собственной квазимономолекулярной пленки на поверхности водоема, приводящей к редким щелчкам, не ограничило возможности уверенно детектировать присутствие исследуемой пленки. Поиск оптимального звукового порога между треском собственной и исследуемой пленки связан с подбором высоты размещения оптической системы над поверхностью воды или ее мощностью.

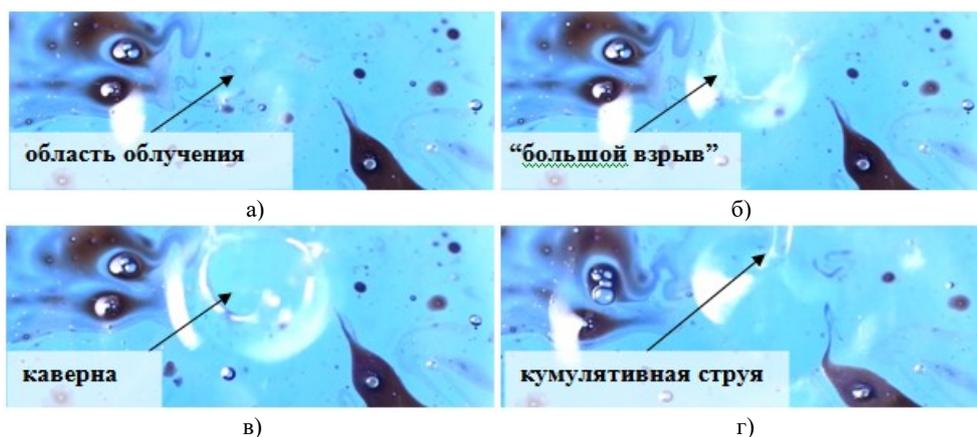


Рис. 4. Фоторяд «большого взрыва» на тонкой нефтяной пленке:  
а) – невозмущенная поверхность перед «взрывом», б) – момент взрыва,  
в) проявление каверны, г) формирование кумулятивной струи

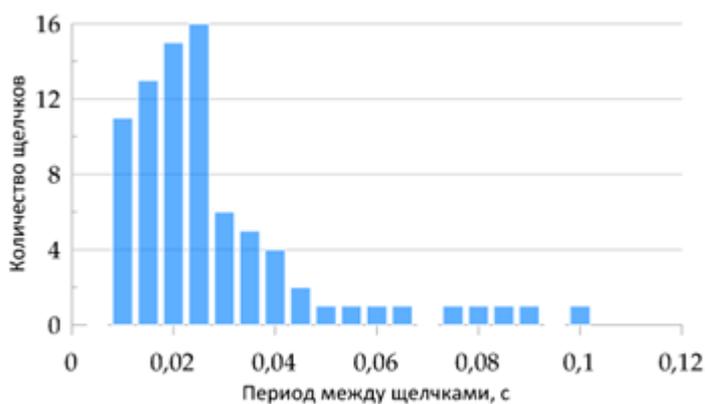


Рис. 5. Функция распределения количества щелчков («больших взрывов») в зависимости от частоты их следования

2. Волнение приводит к модуляции аудиосигнала, что может быть использовано для разработки метода оценки характеристик волнения.

3. Применение лазерной системы без фокусирующей линзы позволяет регистрировать оптоакустический эффект даже с высот порядка 1 м над водной поверхностью, что создает предпосылки к использованию предложенного подхода с борта движущегося судна в реальных морских условиях. При этом вариации интенсивности аудиосигнала будут содержать информацию о волнении, а структура сигнала будет определяться характеристиками пленки на водной поверхности.

### Заключение

В работе представлены результаты исследования визуального проявления оптоакустического эффекта в пленках на водной поверхности. На примере толстой нефтяной пленки с использованием скоростной макровидеосъемки продемонстрированы основные фазы динамических процессов, возникающих и протекающих в жидкости под действием интенсивного лазерного излучения дальнего ИК-диапазона. Анализ полученных видеозаписей позволил установить два потенциальных источника излучения звуковых волн: «большие» и «малые» взрывы воздушных каверн различных масштабов, формирующихся под пленкой в процессе ее нагрева и верхнего водного

слоя. В обоих случаях наступал разрыв пленки, но сопровождался он разными гидродинамическими процессами. Так при «малых взрывах» последующее поведение области облучения напоминало кипение жидкости с выделением пара и мелких брызг. Процессы, следующие после «большого взрыва» оказались схожи с последствиями от падения капли на невозмущенную поверхность жидкости. При этом «малые взрывы» регистрировались не регулярно, в количестве 0–5 штук между «большими взрывами», а для «больших взрывов», как наиболее вероятного источника звука, была построена функция распределения количества щелчков в зависимости от частоты их следования. Согласно этой функции, чаще всего встречались щелчки с периодом следования 0.025 с, что согласуется с полученными ранее результатами спектральной обработки аудиозаписей «треска».

В натуральных условиях оптоакустический эффект также удалось зарегистрировать. Наличие собственной квазимономолекулярной пленки на поверхности водоема не оказало ограничительного воздействия на детектирование исследуемой пленки, а влияние волнения проявилось в модуляции аудиосигнала, что в дальнейшем может быть использовано при разработке сопутствующего метода оценки характеристик волнения.

*Авторы статьи выражают благодарность Богатову Н.А. за организацию видеосъемки.*

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-35-20054.

#### **Список литературы:**

1. Fingas M., Handbook of oil spill science and technology /Fingas M.-Wiley, 2015. -682 p.
2. Дистанционные методы определения толщин пленок нефти и нефтепродуктов на морской поверхности /А.А. Мольков, И.А. Капустин, А.В. Ермошкин, С.А. Ермаков// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса- 2020. -Т. 17. -№3. -С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27
3. Fingas M., The challenges of remotely measuring oil slick thickness / M. Fingas // Remote sensing – 2018. – Vol. 10. – Is. 2. – Pp. 319-337. <https://doi.org/10.3390/rs10020319>
4. Leifer I. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill / I. Leifer, W.J. Lehr, D. Simecek-Beatty, E. Bradley, R. Clark, P. Dennison, J. Wozencraft // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 124. – Pp. 185–209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.024>
5. Kolokoussis P., Oil Spill Detection and Mapping Using Sentinel 2 Imagery/ Kolokoussis P., Karathanassi V.// J. Mar. Sci. Eng. -2018.-Vol 6(1) – Is 4.
6. Thickness measurement and three-dimensional structure imaging of oil slick on water by optical coherence tomography / F. Yana, H. Ru, Z. Li, J. Shi, N. Luo, C. Xie, Y. Zhang, W. Zhang, X. He, Z. Chen // Optik. – 2019.-Vol. 180, Pp. 1036-1042.
7. Study on the hyperspectral polarized reflection characteristics of oil slicks on sea surfaces / Z.Sun, Y. Zhao, G. Yan, S. Li //Chinese Science Bulletin. – 2011. – Vol. 56. – №. 15. – Pp. 1596-1602.
8. Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X / S.A. Ermakov, I.A. Sergievskaya, J. C.B. Da Silva, I.A. Kapustin, O.V. Shomina, A.V. Kupaev, A.A. Molkov // Remote Sens. – 2018 - Vol 10-Is 7, Pp. 1097; <https://doi.org/10.3390/rs10071097>
9. Wang L., Grueneisen Relaxation Photoacoustic Microscopy / L. Wang, C. Zhang, L.V Wang // Phys. Rev. Lett.- 2014. -Vol.113.- Pp.1–5.
10. Биомедицинский оптико-акустический томограф на основе цилиндрической фокусирующей антенны из поливинилиденфлюорида / П.В. Субочев., А.С. Постникова, А.В. Ковальчук, И.В. Турчин // Изв. вузов. Радиофизика. -2017. -Т. 60.- № 3. -С. 260–267
11. Ахманов С.А., Параметрический лазерный излучатель ультразвука. / С.А. Ахманов, О.В. Руденко //Письма в «Журнал технической физики». -1975. -Т. 1. -№ 15. -С. 725–728.
12. Есипов И.Б. Излучение звука движущим со сверхзвуковой скоростью тепловым источником / И.Б. Есипов // Научная сессия Объединенного научного совета АН СССР по комплексной проблеме «Физическая и техническая акустика» Акуст. журн.- 1977. Т. 23.- Вып. 1 – С. 155.
13. Егерев С.В., Есипов И.Б., Лямшев Л.М., Наугольных К.А. Генерация звука длинными лазерными импульсами. Акуст. журн. 1979. Т.25. Вып. 2. С. 220–226.

14. Генерация мощных звуковых импульсов при лазерном нагреве поверхности. Вычислительные методы и программирование, / А.А. Карабутов, Е.А. Лапшин, Г.П. Панасенко, О.В. Руденко // Изд. МГУ Москва. -1979. -Т. 31. -С. 174–183.
15. Brown C.E. The LURSOT sensor: providing absolute measurement of oil slick thickness / C.E. Brown, M.F. Fingas, R.H. Goodman, M. Choquet, A. Blouin, D. Drolet, J.-P. Monchalain, C.D. Hardwick // In: Proceedings of the Fourth Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, USA. -1997- Vol. 1.- Pp.-393–397.
16. Li Y. Experimental Study on Thickness Measuring Method of Oil-on-Water Using Laser-Ultrasonic Technique/ Y. Li, X. Qi, H. Wang // Nami Jishu yu Jingmi Gongcheng/Nanotechnol. Precis. Eng. – 2017. – Vol. 15. – P. 159–167.
17. Underwater optoacoustic detection and characterization of oil films: laboratory study. / P. Subochev, R. Belyaev, M. Prudnikov, V. Vorobyev, I. Turchin, A. Bugrov, A. Pyanova, A. Ermoshkin, I. Kapustin, A. Molkov // Books of abstracts. The 20th International on Photoacoustic and photothermal phenomena: Russia, Moscow, 7-12 July 2019. – 2019. – BP 026. – P. 279.
18. An effect of sound generation due to surfactant films on the water surface illuminated by intensive IR radiation / A.A. Molkov, I.A. Kapustin, S.A. Ermakov, T.N. Lazareva, G.V. Leshchev, I.A. Sergievskaya // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019, - 111501K- (14 October 2019)- Vol. 11150; <https://doi.org/10.1117/12.2533156>
19. Эффект генерации звука мощным излучением ИК-диапазона при облучении воды, покрытой пленкой поверхностно-активного вещества / А.А.Мольков, И.А. Капустин, С.А. Ермаков, Т.Н. Лазарева, Г.В. Лешев, И.А. Сергиевская// Тезисы конференции: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». -2019 г-. С. 307.
20. Ильиных А.Ю., Гидродинамика контакта падающей капли со свободной поверхностью жидкости/ А.Ю. Ильиных, Ю.Д. Чашечкин // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа -2016. -№2. -С. 3–12.

## THE VISUAL MANIFESTATION OF THE OPTOACOUSTIC EFFECT IN FILMS ON WATER

**Alexander A. Molkov**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia  
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Stanislav A. Ermakov**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia  
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Irina A. Sergievskaya**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia  
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Tatyana N. Lazareva**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

**George V. Leshchev**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. Recently, in the laboratory experiments we have presented effect of sound generation in air seems like «crackling» when a film on the water surface was irradiated by IR- laser radiation with a wavelength of 10.5  $\mu\text{m}$ . For clean water surface, no crackling was detected. It means, that film presence significantly changed the conditions for the formation of local heating areas in water and acoustic waves emission. The sound characteristics were preliminarily investigated depending on the water temperature, the film thickness and its substance, as well as the radiation intensity. However, the effect insufficient repeatability in some experiments stimulated additional studies of the observed optoacoustic effect in order to obtain visual information about the processes occurring in the irradiated area using video recording. This study results are presented in this paper on the example of a laboratory and field experiments.*

*Keywords: optoacoustic, surfactant films, slicks, macro photography, high-speed shooting*

**References:**

1. Fingas M. Handbook of oil spill science and technology. Wiley. 2015. 682p.
2. Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V. Ermakov S.A. «Distancionnye me-tody opredeleniya tolshchin plenok nefi i nefteproduktov na morskoy poverhnosti» (Remote sensing methods for measuring the thickness of oil/oil product films on the sea surface) *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*.17.3 (2020): 9–27.
3. Fingas M., «The challenges of remotely measuring oil slick thickness» *Remote sensing* 10. 2 (2018): 319-337 <https://doi.org/10.3390/rs10020319>
4. Leifer I., Lehr W.J., Simecek-Beatty D., Bradley E., Clark R., Dennison P., J. «Wozencraft State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill» *Remote Sensing of Environment* 124(2012): 185-209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.024>
5. Kolokoussis P., Karathanassi V., «Oil Spill Detection and Mapping Using Sentinel 2 Imagery» *J. Mar. Sci. Eng.* 6.4 (2018)
6. Yana F., Ru H., Li Z., Shi J., Luo N., Xie C., Zhang Y., Zhang W., He X., Chen Z. «Thickness measurement and three-dimensional structure imaging of oil slick on water by optical coherence tomography» // *Optik*. 180(2019): 1036-1042
7. Sun Z., Zhao Y., Yan G., Li S., «Study on the hyperspectral polarized reflection characteristics of oil slicks on sea surfaces» *Chinese Science Bulletin* 56.15 (2011): 1596-1602
8. Ermakov S.A., Sergievskaya I. A., Da Silva J. C.B., Kapustin I.A., Shomina O.V., Kupaev A.V., Molkov A.A. «Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X» *Remote Sens* 10/7 (2018):1097 <https://doi.org/10.3390/rs10071097>
9. Wang L., Zhang C., Wang L.V. «Grueneisen Relaxation Photoacoustic Microscopy» *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014): 1-5.
10. Subochev P.V., Postnikova A.S., Kovalchuk A.V., Turchin I.V. «Biomedicinskij optiko-akusticheskiy tomograf na osnove cilindricheskoj fokusiruyushchej anteny iz polivinilidenflyuorida» (Biomedical photoacoustic tomograph based on a cylindrical focusing PVDF antenna) *Izvestiya vuzov. Radiofizika* 60.3 (2017): 260-267
11. Ahmanov S.A., Rudenko O.V. «Parametricheskij lazernyj izluchatel ultrazvuka» *Pisma v «Zhurnal tekhnicheskoy fiziki»* 1.15 (1975): 725-728
12. Esipov I.B. «Izluchenie zvuka dvizhushchim so sverhzhukovoy skorost'yu teplovym istochnikom. *Akust. zhurn.* 23.1 (1977): 155
13. Egerev S.V., Esipov I.B., Lyamshev L.M., Naugolnyh K.A. «Generaciya zvuka dlinnymi lazernymi impulsami» *Akust. zhurn* 25.2 (1979): 220-226
14. Karabutov A.A., Lapshin E.A., Panasenko G.P., Rudenko O.V. «Generaciya moshchnyh zvukovyh impulsov pri lazernom nagreve poverhnosti. Vychislitel'nye metody i prorammirovaniye», *Izd. MGU Moskva* 31(1979): 174-183
15. Brown C.E., Fingas M.F., Goodman R.H. Choquet M., Blouin A., Drolet D., Monchalin J.P., Hardwick C.D. «The LURSOT sensor: providing absolute measurement of oil slick thickness» *Proceedings of the Fourth Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, USA.* 1( 1997): 393–397.
16. Li Y., Qi X., Wang H., «Experimental Study on Thickness Measuring Method of Oil-on-Water Using Laser-Ultrasonic Technique» *Nami Jishu yu Jingmi Gongcheng/Nanotechnol. Precis. Eng.* 15 (2017): 159–167.
17. Subochev P., Belyaev R., Prudnikov M., Vorobyev V., Turchin I., Bugrov A., Pyanova A., Ermoshkin A., Kapustin I., Molkov A. Underwater optocoustic detection and characterization of oil films: laboratory study. Books of abstracts. The 20th International on Photoacoustic and photothermal phenomena: Russia, Moscow, (7-12 July 2019): 279
18. Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermakov S.A., Lazareva T.N., Leshchev G.V., Sergievskaya I.A., «An effect of sound generation due to surfactant films on the water surface illuminated by intensive IR radiation», *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019*, 11150 (14 October 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2533156>
19. Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermakov S.A., Lazareva T.N., Leshchev G.V., Sergievskaya I.A. «Effekt generacii zvuka moshchnym izlucheniem IK-diapazona pri obluchenii vody, pokrytoj plenкой poverhnostno-aktivnogo veshchestva» *Tezisy konferencii: «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»* (2019):307
20. Ilinykh A.Y., Chashechkin Y.D. «Gidrodinamika kontakta padayushchej kapli so svobodnoj poverhnostyu zhidkosti» *Izvestiya Rossijskoj Akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza* 2(2016): 3-12

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Мольков Александр Андреевич**, к.ф.-м.н., научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120, ул. Ульянова, 46, старший научный сотрудник кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: a.molkov@inbox.ru

**Ермаков Станислав Александрович**, д.ф.-м.н., зав. отделом радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС- 120, ул. Ульянова, 46, Зав. кафедрой гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: stas.ermakov8@gmail.com

**Сергиевская Ирина Андреевна**, к.ф.-м.н., зав. лабораторией оптических методов, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120, ул. Ульянова, 46, старший научный сотрудник кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: onw2009@mail.ru

**Лазарева Татьяна Николаевна**, ведущий программист отдела радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46, e-mail: lazareva@ipfran.ru

**Лещёв Георгий Владимирович**, инженер отдела радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС – 120, ул. Ульянова, 46, e-mail: georgeleshev@gmail.com

**Aleksandr A. Molkov**, Ph.D., Researcher of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanova st, Novgorod, 603950, Senior researcher of the Department of Hydrodynamics, Vessel Theory and Ecological Safety, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

**Stanislav A. Ermakov**, Ph.D., Head of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanova st, Novgorod, 603950, Head of the Department of Hydrodynamics, Vessel Theory and Ecological Safety, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

**Irina A. Sergievskaya**, Ph.D., Head of the Optical method laboratory, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanova st, Novgorod, 603950, Senior researcher of the Department of Hydrodynamics, Vessel Theory and Ecological Safety, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

**Tatyana N. Lazareva**, Leading Programmer of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanova st, Novgorod, 603950,

**George V. Leshchev**, Engineer of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanova st, Novgorod, 603950,

Статья поступила в редакцию 27.07.2020 г.

УДК 005.83:86.

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.101>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ НА СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ С ЕДИНИЧНЫМ И МЕЛКОСЕРИЙНЫМ ТИПАМИ ПРОИЗВОДСТВА

**О.Н. Осипов**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**Т.А. Михеева**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация. В статье рассматривается целесообразность применения автоматизированных систем управления проектами (АСУП) на судостроительных заводах с единичным и мелкосерийным типами производства. В настоящее время происходит интенсивное усложнение и увеличение масштабов судостроительного производства. В производство внедряются экономико-математические методы управления и информационные технологии, которые обладают быстродействием, гибкостью логики, значительным объемом памяти [1]. Информационные технологии служат базой для разработки АСУП и качественно изменяют форму управления, значительно повышая его эффективность. Однако не все судостроительные заводы имеют финансовую возможность для внедрения автоматизации в управление производством, так как все программные продукты АСУП дорогостоящие. Кроме приобретения программного обеспечения необходимо переоборудование всего производства.*

*Представлены достоинства применения АСУП, их цели и решаемые с помощью их задачи, которые возникают при сборе, обработке большого количества информации и реализации сложных законов управления в процессе производства. В статье отражены актуальность и преимущество возможного применения АСУП на судостроительных заводах с единичным и мелкосерийным типами производства при условии соблюдения последовательности основных этапов производства. Разработан наиболее доступный принцип внедрения АСУП в условиях единичного и мелкосерийного производства с наименьшими финансовыми затратами.*

*Ключевые слова: судостроительный завод, производство, системы управления проектами, автоматизированные системы управления, информационные системы, управление проектами, графики, судостроительное предприятие, организация производства.*

### Введение

Судостроительное производство характеризуется высокой трудоёмкостью, широким разнообразием производимых работ, что сопоставимо с космической отраслью, а по продолжительности работ превосходящее авиапромышленность. Однако в настоящее время не все отечественные судостроительные и судоремонтные заводы могут эффективно справляться с работами такого уровня сложности и участвовать в конкуренции. Главную задачу технологической неразвитости судостроительных заводов России можно решить внедрением автоматизированных систем управления [2] планирования и учета. Автоматизация процедур управления проектами в целом действительно является весьма эффективным способом обеспечения выполнения контрактных обязательств, развития предприятия, повышения эффективности его работы, планирования и управления производством продукции.

На сегодняшний день можно говорить о положительных изменениях в судостроительной отрасли. На современных судостроительных заводах активно меняется производственное оборудование с механизированного на автоматизированное, что приводит к почти полному исключению участия человека в процессе производства. В этой ситуации повышается значимость автоматизации процесса управления большим количеством технологического оборудования, согласования его функционирования. Применение АСУ на заводах обеспечивает сбор и обработку информации, которая оптимизирует процесс управления [3], [4] всем производством одновременно. В АСУ человек активно участвует в процессе управления производством, что обеспечивает гибкость и адаптивность всех технологических процессов.

Проблемой судостроительных заводов с единичным и мелкосерийным типом производства является отсутствие финансов на внедрение полного пакета АСУ и автоматизации процесса производства с переоборудованием цехов. В данной ситуации есть различные варианты решения этой проблемы. В статье рассмотрена возможность применения АСУ на судостроительных предприятиях с ограниченными финансовыми возможностями и приведён алгоритм внедрения проектного управления.

### **Цели, задачи и виды информационных систем управления проектами на судостроительных заводах**

Автоматизированные системы управления проектами являются человеко-машинными системами, которые предназначены для сбора и обработки информации, необходимой для управления производственными процессами и коллективами людей. В их основе лежат различные информационные потоки и системы. На предприятиях судостроения вне зависимости от масштабов производства присутствует значительное количество различных информационных потоков, которые нуждаются в быстрой обработке и принятии оптимального решения. Все информационные потоки на производстве формируются в информационные системы [5].

Цель информационных систем, которые присутствуют на предприятии – получение информации с высокой достоверностью для эффективного принятия решений.

Задачами информационных систем является:

- обеспечение взаимосвязи и взаимодействия элементов существующей системы в рамках данного производства;
- представление отчётов о нормальном ходе производственного процесса;
- представление информации о ситуациях, вызванных любыми отклонениями от нормального процесса.

Различают два вида информационных систем:

1. Информационно-справочные (пассивные), которые поставляют информацию специалисту после его связи с системой по соответствующему запросу,
2. Информационно-советующие (активные), которые сами периодически выдают специалисту предназначенную для него информацию [6].

В информационно-справочных системах вычислительная техника необходима только для сбора и обработки информации об управляемом объекте. На основе информации, переработанной вычислительной техникой и предоставленной в удобной для восприятия форме, специалист принимает решения относительно способа управления объектом.

Системы сбора и обработки данных выполняют в основном те же функции, что и системы централизованного контроля и являются более высокой степенью их организации. Отличия носят преимущественно качественный характер.

В информационно-советующих системах наряду со сбором и обработкой информации выполняются следующие функции:

- определение рационального технологического режима функционирования по отдельным технологическим параметрам процесса;

– определение управляющих воздействий по всем или отдельным параметрам технологического процесса;

– определение значений (величин) установок локальных регуляторов.

Данные информационного потока о технологических процессах и управляющих воздействиях поступают через средства отображения информации в форме рекомендаций работающему специалисту. Принятие решений работником предприятия основывается на собственном понимании хода технологического процесса, его последовательности и опыта управления им.

В зависимости от участия специалиста в процессе управления, форм связи, средств контроля и управления все информационные системы можно разделить на два класса [7]:

1. Системы, обеспечивающие сбор и выдачу в удобном виде информации о ходе технологического или производственного процесса. В результате соответствующих расчётов определяют, какие управляющие воздействия следует произвести, чтобы управляемый процесс протекал наилучшим образом. Основная роль принадлежит человеку, а машина играет вспомогательную роль, выдавая для него необходимую информацию.

2. Управляющие системы, которые собирают информацию и выдают команды исполнителям или исполнительным механизмам. Эти системы работают обычно в реальном времени, т.е. в темпе технологических или производственных операций судостроительного завода. В управляющих системах функциональная роль принадлежит машине, а человек контролирует и решает более сложные вопросы, которые по тем или иным причинам не могут решить вычислительные средства системы.

Управляющие системы, в свою очередь, имеют несколько разновидностей: supervisory системы управления и системы прямого цифрового управления. Выбор их применения зависит от сложности, количества технологических процессов и иерархической системы управления производством.

В судостроении применяются оба класса информационных систем в зависимости от специфических особенностей и объёмов судостроительного производства.

АСУ, используя различные виды и классы информационных систем и потоков, перерабатывая информацию, осуществляет функции управления по определённым заданным программам, заранее предусматривающим действия, которые должны быть предприняты в той или иной производственной ситуации. За человеком остаётся общий контроль и вмешательство в тех случаях, когда возникают непредвиденные алгоритмами управления обстоятельства. Основное назначение АСУ – это не просто собрать и сохранить электронные информационные ресурсы, но обеспечить к ним доступ пользователей и оптимальное их применение в процессе производства. Обработывая значительное количество информационных потоков в процессе производства, АСУ имеет возможность определять очевидность выполнения программ и подпрограмм, управлять и руководить загрузкой вычислительных устройств, вырабатывать оптимальные управляющие воздействия, а также с помощью соответствующих преобразователей передавать команды управления на исполнительные механизмы.

### **Актуальность применения на судостроительных заводах АСУП**

Применение на судостроительных заводах АСУП, как показывает опыт их внедрения на отечественных предприятиях [8], позволяет достигать более высоких показателей эффективности производства. При использовании принципов автоматизации для регулирования и управления производством появляется возможность выбора оптимальных вариантов технологических процессов, реализации оптимизирующих их параметров, адаптации к изменению требований рынка, снижения расходов на техническое обслуживание и унификации средств контроля и управления.

Переход на рыночные отношения всех отраслей отечественной промышленности, в том числе и судостроительной отрасли, требует интенсификации производства, что

обуславливает необходимость наличия программного обеспечения для каждого этапа строительства судна и управления предприятия в целом. Внедрение АСУ на судостроительном предприятии влечёт за собой кардинальные изменения всего производства и управления им [9]. Перестройка производства, принципов управления и программного обеспечения требуют серьёзных вложений. Однако, начиная такие изменения с многомиллионными вложениями в модернизацию судостроительного предприятия, его руководитель должен быть уверен в успехе. Эта уверенность достигается чётким пониманием целей и задач, которые стоят перед предприятием и знанием путей их решения, а также умением руководить производственным персоналом.

В настоящее время в условиях рыночной экономики перед современным судостроительным предприятием стоят следующие цели:

- повышение производительности труда;
- сокращение сроков подготовки производства и сроков изготовления продукции;
- повышение качества продукции и степени удовлетворённости клиентов;
- снижение стоимостных издержек и себестоимости производимой продукции;

Для достижения перечисленных целей необходимо решить первостепенные задачи:

- формирование интеллектуальной собственности предприятия (патенты на изобретения и лицензионное программное обеспечение);
- обеспечение информационными потоками АСУП и постоянное их насыщение актуальной информацией;
- возможность интегрирования и унификации производства;
- обеспечение соответствия предприятия требованиям международных стандартов.

Основываясь на перечисленных целях и задачах, вопрос о внедрении автоматизированных систем управления становится актуальным и просто необходимым.

Процесс работы современного судостроительного предприятия [10] можно разделить на пять основных этапов. Роль и значение АСУ на этих этапах представлено в Таблице 1.

Таблица 1

№ этапа	Название этапа	Содержание и основные характеристики этапа	Требования к судостроительным заводам	Роль автоматизации на этапе
1	Конкурс	Заказчик объявляет конкурс на изготовления судна, предъявляя определенные технические требования: габаритные размеры; вместимость; скорость; показатели прочности; дальности плавания; автономности плавания; уровень автоматизации; комфортность пассажирских и служебных помещений. Конструкторским бюро разрабатывается эскизный проект в соответствии с требованиями заказчика. Точные чертежи конструкций будущего судна отсутствуют	Судостроительные заводы, участвующие в конкурсе, оперативно предоставляют заказчику информацию о стоимости и сроках изготовления судна и серии судов. У судостроительного завода-изготовителя должен быть высококвалифицированный персонал и налажено современное производство. Специализированный персонал завода в кратчайшие сроки должен своевременно произвести расчет стоимости изготовления судна и прислать предложение на конкурс. В случае отсутствия данной информации завод проиграет конкурс, так как конкуренция на этом рынке крайне высокая.	Без АСУ невозможно быстро произвести расчет стоимости изготовления судна и прислать предложение на конкурс, так как эта работа трудоёмка и требует концентрации большого количества информации. В лучшем случае завод будет подбирать схожие проекты, которые уже изготавливались, и давать приблизительную оценку стоимости по аналогии. Если это новый проект, то быстрая оценка без АСУ вообще невозможна.

№ этапа	Название этапа	Содержание и основные характеристики этапа	Требования к судостроительным заводам	Роль автоматизации на этапе
2	Проектирование	После того как завод выиграл конкурс, начинается оперативная разработка проектной документации на судно. Работа по проектированию судна крайне сложная, длительная (до года), часто ее передают в сторонние специализированные конструкторские бюро. Стоимость конструкторской работы высока.	Производство нельзя начинать, пока не разработана проектная документация по судну. Однако процесс проектирования и согласования может занять длительный период. Малое количество судов (единичное производство) в серии заставляет предприятие вести проектирование и строительство судна параллельно, в лучшем случае с небольшим опережением процесса проектирования. На практике часто получается так, что полный комплект конструкторской документации на судно становится доступен только после окончания работ по строительству. В результате чего, изменяются затраты на проект, сроки готовности работ, высока доля брака и переделок.	Процесс проектирования современного судна невозможен без АСУ. Чем лучше организован этот процесс, тем быстрее и дешевле можно получить проектную документацию на судно. С помощью АСУ есть возможность изменить организацию проектных работ, что является серьезным конкурентным преимуществом, которое недоступно многим зарубежным судостроителям: корейские верфи, например, вынуждены отдавать разработку сложных проектов на аутсорсинг в США и Европу.
3	Подготовка производства	После разработки конструкторско-технологической документации на судно, производится подготовка производства. В силу масштаба работ это достаточно трудоемкий и длительный процесс.	Процесс подготовки производства длительный, может занимать несколько месяцев, а также требует существенных вложений в капитальное строительство и переоборудования построенных мест. Работы по модернизации производства необходимо планировать, рассчитывать их стоимость и контролировать выполнение.	Работы по подготовке производства постройки судна необходимо планировать и контролировать, что без АСУ сделать крайне затруднительно.
4	Производство	Организация процесса постройки судна ещё более сложна, чем организация предыдущих этапов. Он представляет собой комбинацию из уникального производства (иногда и НИОКР) и серийного производства. В работе участвуют практически все цеха судостроительного завода, где выполняются десятки технологических процессов и опе-	Работы должны выполняться своевременно: недопустимо не только отставание, но и опережение производственного графика. Это связано с особенностями судостроительного производства – готовые узлы и секции большого размера сложно хранить. С процессом производства тесно увязан процесс снабжения материалами, инструментами, комплектующими. Все закупки должны иметь точную привязку ко времени потребности либо быть в наличии на	Процесс производства, сопровождаемый доставкой на рабочие места материалов, инструментов, комплектующих, без координации со стороны АСУ практически не возможен. Планирование работ и оперативный учет их результатов также выполнить сложно без автоматизации процесса производства.

№ этапа	Название этапа	Содержание и основные характеристики этапа	Требования к судостроительным заводам	Роль автоматизации на этапе
		раций различной степени сложности.	складе.	
5	Техническое обслуживание и модернизация	Построенное судно спускают на воду для проведения ходовых и швартовных испытаний. После испытаний судно сдаётся заказчику, который в дальнейшем его эксплуатирует по назначению. Однако работы предприятия по данному проекту ещё не завершены: судно требуется регулярное техническое обслуживание и по мере надобности – модернизация. Все эти процессы должны проходить под техническим надзором предприятия и, чаще всего, на базе завода-изготовителя.	Современный завод-изготовитель должен быть оборудован механизированными и автоматизированными средствами технологического оснащения. Только в этом случае судостроительный завод сможет участвовать в конкурсах и получать заказы на строительство судов. Также завод-изготовитель должен предоставить заказчику полную информацию о том, куда и в каком количестве были потрачены средства, выделенные на строительство судна.	Для ведения электронного «досье» изготовленного судна, в котором хранится информация о конструкции, технологии, техническом обслуживании, рекламациях, проведенных модернизациях и ремонтах, требуется АСУ, адаптированные под судостроение. Кроме того, каждая серия судов имеет целевое финансирование. В связи с этим, кроме обязательств выпуска судна в срок и с должным качеством, предприятие должно предоставить заказчику полную информацию о потраченных средствах. Для ведения такого учёта требуются современные комплексные средства автоматизации.

Анализируя каждый этап производственного процесса постройки судна на российских предприятиях, можно заключить, что участие в нём АСУП является неотъемлемым элементом данного процесса. Грамотно спроектированная автоматизированная система решает множество задач предприятия. Благодаря внедрению АСУП появляется возможность увеличения объема выпускаемой продукции, сокращения трудоёмкости производственных процессов и ликвидации процента брака по вине человека [11]. Система достаточно быстро окупает вложенные средства, затраченные на ее разработку, проектирование и эксплуатацию.

Основными показателями эффективности АСУП являются:

- повышение производительности труда,
- увеличение объема производства,
- улучшение качества выпускаемой продукции,
- рациональное использование сырья,
- снижение эксплуатационных затрат;
- уменьшение доли ручных операций.

Актуальность внедрения автоматизации судостроительного производства и управления им очевидна в условиях рыночной экономики.

#### **Специфика внедрения АСУП на судостроительных заводах с единичным и мелкосерийным типами производства**

При автоматизации судостроительного предприятия с единичным и мелкосерий-

ным типами производства имеется своя специфика. Как упоминалось ранее, такие предприятия имеют ограниченные финансовые возможности, и при планировании модернизации производства им необходимо либо найти инвестора, либо взять кредит в банке, либо принять решение о внедрении АСУП не в полном объёме, а лишь частично (самые необходимые блоки).

Кроме того, надо учитывать следующие производственные особенности мелких судостроительных заводов:

- большой объем незавершенного производства, что влияет на оплату труда специалистам и на финансирование покупки материалов и комплектующих;
- привлечение значительных кредитных средств для строительства судов;
- получение прибыли только после реализации полностью завершенной продукции;

– в строительстве судна участвует весь судостроительный завод, при этом всегда часть работ будет производиться по плану с определённым ритмом и тактом, а часть работ и деталей – с некоторым запозданием и остановками. Это может быть вызвано технологическими и финансовыми трудностями;

– процесс рабочего проектирования сочетается с параллельным строительством, что обуславливает наличие значительного количества корректировок в рабочей документации, в технологии и организации постройки судна;

– двухуровневый подход к планированию, один уровень которого представляет собой межцеховой план работ по проекту судна (сроки готовности работ по цехам) с точным внутрицеховым распределением, а другой уровень – это измерение производительности основных цехов не в объемах рабочего времени, а в тоннах переработанного металла цехом за плановый период;

– двухуровневый подход к нормированию работ – нормы трудоемкости по межцеховому выполнению плана работ и нормы трудоёмкости, привязанные к тонне перерабатываемого металла;

– значительный объём информационной базы и задач управления;

– контроль выполнения работ требует сложного подтверждения, так как процесс выпуска отдельного блока судна может длиться несколько месяцев, готовое изделие отсутствует, и нет подтверждения факта выполнения работ. В связи с этим предприятию нужно тщательно контролировать сам процесс изготовления отдельного блока судна. Для такого контроля применяется подход, который похож на «процентовку» в строительстве [12].

Контроль готовности работ ведется по нескольким параметрам:

- процент готовности блока, который заявляет начальник цеха;
- процент готовности блока, который подтверждает ОТК;
- процент использования материалов (план/факт по блоку);
- процент начисления зарплаты сотрудникам цеха-изготовителя блока (контроль план/факт по блоку).

Перечисленные специфические особенности мелких судостроительных предприятий оказывают существенное влияние на принятие решений со стороны их руководства о внедрении в производство АСУП, выборе программного обеспечения, целесообразности приобретения современного технологического оборудования и на сам процесс перехода на автоматизированное управление производством. В случае принятия положительного решения по установке системы автоматизации управления судостроительного производства необходимо учитывать, что это будет достаточно трудоёмкий и финансово-затратный процесс, который невозможно будет осуществить без поддержки со стороны государства или инвесторов.

### **Алгоритм внедрения АСУП на судостроительных предприятиях**

В том случае, если руководство судостроительного предприятия с единичным или мелкосерийным типом производства принимает решение о внедрении АСУП, то ему

необходимо не только учитывать специфику внедрения, но и разработать чёткий пошаговый алгоритм реорганизации производства.

Алгоритм внедрения проектного управления состоит из следующих этапов [13]:

1. Прежде всего, необходимо определить, кто будет разрабатывать АСУП. Есть три варианта решения проблемы: разработка системы собственными силами; приобретение универсальной системы или пакета прикладных программ; делегирование функций и полномочий по внедрению информационных технологий внешним организациям (аутсорсинг). У каждого варианта есть свои достоинства и недостатки, поэтому руководству предстоит сложный выбор одного из трёх вариантов.

2. Максимально систематизировать и определить все технологические процессы и системы управления, которые необходимо автоматизировать.

3. Необходимо произвести частичную реорганизацию производственной структуры управления предприятия и технологий организации производства. В связи с этим, важнейшим этапом проекта внедрения АСУП, является полное и достоверное обследование предприятия по всем направлениям его деятельности. На основе заключения, полученного в результате обследования, будет строиться вся дальнейшая схема создания корпоративной информационной системы.

4. Продумать технологию работы с входящей и исходящей информацией, в соответствии с чем, изменить принципы организации производства, применив теорию логистики организации рабочих мест.

5. Сформировать квалифицированную группу (3–6 человек) внедрения и сопровождения АСУП, назначить руководителя группы, наделив его определёнными полномочиями.

6. Преодолеть сопротивление сотрудников предприятия, связанное со страхом перед нововведениями, консерватизмом, опасением потерять работу или утратить свою незаменимость, боязнью существенно увеличивающейся ответственности за свои действия.

7. Повысить уровень мотивации сотрудников к освоению АСУП путём поощрений и благодарностей. Так как при внедрении системы управления предприятием временно увеличиваются нагрузки на сотрудников, то необходимо принять организационные меры по сокращению срока параллельного ведения дел.

Приведённый алгоритм внедрения АСУП является упрощённым путём при решении такого серьёзного вопроса как автоматизация производства. В этом сложном процессе необходимо решать много производственных проблем, корректировать большое количество процессов, отлаживать механизм поступления и передачи информации. Важным моментом является выбор программного обеспечения, так как программные продукты весьма дорогостоящие.

Однако есть возможность избежать внедрения дорогих программных продуктов и не рисковать инвестициями [14], [15]. Можно пойти по упрощенному пути:

1. Определить перечень процессов, который необходим на старте.

2. Определить проекты, на которых будут обкатываться эти процессы, участников проектов, их квалификацию, потребности этих проектов, их заказчиков и исполнителей.

3. Определить бюджет, который будет использован для покупки программного продукта.

4. В соответствии с бюджетом рассмотреть различные предложения на рынке программных продуктов и выбрать подходящую систему.

5. Для этого необходимо:

– найти решение, которое поддерживает требования к процессам и уровню автоматизации;

– упростить решение для пользователей, чтобы сотрудники могли быстро понять, как в нем работать – дружественный интерфейс и возможность самостоятельного быстрого обучения;

– решение, позволяющее автономно его перенастраивать, чтобы не тратить сред-

ства на программирование (экономия на работе ИТ – специалистов и заказной разработке);

– возможность аренды – чтобы не тратить сразу средства для серверных мощностей и не связываться с необходимостью собственной поддержки работоспособности;

– проанализировать какие продукты используют более крупные предприятия, по возможности перенять опыт пользования.

На начальном этапе нужно попробовать более лёгкий, менее затратный, путь внедрения АСУП для принятия окончательного решения о целесообразности перестройки всей организационной системы производства. Необходимо проверить возможности автоматизированной системы управления, сделать выводы о её экономической эффективности и затем принять решение о приобретении необходимых, более серьёзных, инструментах автоматизации.

### **Заключение**

Управление современным судостроительным предприятием сложно представить без автоматизации процессов производства. За счет автоматизации удастся освободить время для решения профильных задач, сократить процент ручных операций и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции на рынке.

Внедрение новых технических средств автоматического управления помогает усовершенствовать действующий технологический процесс, увеличить скорость операций и повысить уровень безопасности на предприятии. В настоящее время любая проектная организация и промышленное предприятие, получая серьёзный заказ, осознают, что без средств автоматизации нет возможности достичь высокого качества и скорости выполнения работ. То же происходит и в судостроительной отрасли. Заказчик, прежде чем разместить заказы на проектирование или строительство судна, изучает предлагаемые методы выполнения данной работы [16]. Решающим фактором для заказчика является качество и сроки выполнения проектно-конструкторской, рабочей и технологической документации с применением систем автоматизированного проектирования. Внедрение на предприятии АСУП является трудным, но необходимым шагом. Особенно трудно внедрить АСУП на судостроительных предприятиях с единичным и мелкосерийным типом производства. Однако используя предложенные в статье рекомендации и дифференцированный подход к выбору программного обеспечения, есть возможность постепенной реорганизации и частичной автоматизации систем управления мелких судостроительных предприятий. Для этой цели очень важно определить те объекты управления производства, которые нуждаются в первоочередной автоматизации. Проведение локальной автоматизации позволит избежать больших материальных затрат и серьёзной перестройки налаженного производства, которая может негативно повлиять на его функционирование.

### **Список литературы:**

1. Бесекаерский В.А., Попов Е.П. «Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 747 с.
2. «Теория автоматического управления»: Учеб. для машиностроит. спец. вузов/В.Н. Брюханов, М.Г. Косов, С.П. Протопопов и др.; Под ред. Ю.М. Соломенцева. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк.; 2000. – 268 с.: ил.
3. ГОСТ 24.702. Межгосударственный стандарт. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Эффективность автоматизированных систем управления.
4. Гудвин Г.К., С.Ф. Гребе, М.Э. Сальдаго «Проектирование систем управления»; пер. с англ. – М.:БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
5. Михеева Т.А. Бурмистров Е.Г. Сравнительная характеристика программных продуктов в области управления проектами и проблемы их применения на отечественных судостроительных верфях //Т.А. Михеева, Е.Г. Бурмистров. – Текст : непосредственный // Вестник ВГАВТ. – 2016. – Вып. № 49. – С. 130–141.

6. Автоматизация судостроительных предприятий. <http://upr.ru/article/rossiyskie-praktiki-upravleniya/>
7. Фролов Е.Б. Современные концепции управления в производственной логистике: MES для дискретного производства – метод вычисляемых приоритетов (рус.) // САПР и графика: журнал. – М.: Компьютер Пресс, 2011. – № 1. – С. 71–75.
8. Специфика автоматизации судостроительных предприятий на 1С: ERP <https://infostart.ru/public/614629/>
9. [http://studopedia.ru/14\\_39006\\_zarubezhnie-ERP-sistemi.html](http://studopedia.ru/14_39006_zarubezhnie-ERP-sistemi.html) дата обращения: 26.05.2020
10. [http://ejustice.cnews.ru/reviews/free/industry2005/articles/integration\\_erp.shtml](http://ejustice.cnews.ru/reviews/free/industry2005/articles/integration_erp.shtml) дата обращения: 26.05.2020
11. <https://doi.org/10.1002/leap.1300>: «Factors influencing the choice of a publication venue in library and information science» // Jongwook Lee, Kiduk Yang, Dong-Geun Oh // First published: 22 May 2020
12. Pop C, Cioara T, Antal M, Anghel I, Salomie I, Bertoncini M. Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids. *Sensors*. 2018; 18(1): 162
13. Buterin V. Ethereum scalability research and development subsidy programs. <https://blog.ethereum.org/2018/01/02/ethereum-scalability-research-development-subsidy-programs/>
14. Система управления проектами. <http://www.advanta-group.ru/about-system/>
15. Слуцкий Н.Г. Особенности управления судостроительным производством // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 6. – С. 57–59; URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=23228> (дата обращения: 23.05.2020).
16. Минченко Л.В. Системы автоматического проектирования в судостроении / Л.В. Минченко, Т.А. Кандратова. – Текст : непосредственный // Современные тенденции технических наук : материалы V Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2017 г.). – Казань : Бук, 2017. – С. 73–76. – URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/230/12335/> (дата обращения: 21.05.2020).

## **A STUDY ON APPLICABILITY OF AUTOMATED PROJECT MANAGEMENT SYSTEMS AT SHIPBUILDING PLANTS WITH A SINGLE AND SMALL-SCALE PRODUCTION TYPES**

**Oleg N. Osipov**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Tatyana A. Mikheeva**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The article deals with the feasibility of application of automated project management systems (ACS) at shipbuilding plants with single and small-scale production types. Currently, there is an intensive complication and increase in the scale of shipbuilding production. Economic and mathematical management methods and information technologies are being introduced into production, which have high speed, logic flexibility, and a significant amount of memory. Information technologies serve as the basis for the development of automated control systems and qualitatively change the management form, significantly increasing its efficiency. However, not all shipbuilding plants have the financial ability to introduce automation into production management, since all automated control system software products are expensive. In addition to purchasing the software, the entire production requires re-equipment.*

*The authors present the advantages of using ACS, their goals, and solved with their help tasks, which arise in collecting and processing of a large amount of information and in complex control laws implementation of in the production process. The article reflects the relevance and advantages of possible ACS application at shipbuilding plants with single and small-scale production types, subject to the sequence of the main production stages. The most affordable principle of ACS implementation in the conditions of single and small-scale production with the lowest financial costs has been developed.*

**Keywords:** *shipbuilding plant, production, project management systems, automated control systems, information systems, project management, graphics, shipbuilding enterprise, production organization.*

**References:**

1. Besekersky V.A., Popov E.P. Theory of automatic control systems. – 4th ed., Revised. and add. – St. Petersburg: Profession, 2003 .- 747 p.
2. «Theory of automatic control»: Textbook. for machine building. specialist. universities / V.N. Bruchanov, M.G. Kosov, S.P. Protopopov and others; Ed. Yu.M. Solomentseva. – 3rd ed., Erased. – М.: Higher. school; 2000 .-- 268 p.: Ill.
3. GOST 24.702. Interstate standard. Unified system of standards for automated control systems. The effectiveness of automated control systems.
4. Goodwin G.K., S.F. Grebe, M.E. Saldago «Design of control systems»; trans. from English – М.: BINOM, Laboratory of Knowledge, 2004. – 911 p.
5. Mikheeva T.A. Burmistrov E.G. Comparative characteristics of software products in the field of project management and problems of their application in domestic shipyards // T.A. Mikheeva, E.G. Burmistrov. – Text: direct // Bulletin of VGAVT. – 2016. – Issue. No. 49. – S. 130–141.
6. Automation of shipbuilding enterprises. <http://upr.ru/article/rossiyskie-praktiki-upravleniya/>
7. Frolov EB Modern management concepts in production logistics: MES for discrete production – a method of computed priorities (rus.) // CAD and Graphics: Journal. – М.: Computer Press, 2011. – No. 1. – S. 71-75.
8. The specifics of automation of shipbuilding enterprises at 1C: ERP <https://infostart.ru/public/614629/>
9. [http://studopedia.ru/14\\_39006\\_zarubezhnie-ERP-sistemi.html](http://studopedia.ru/14_39006_zarubezhnie-ERP-sistemi.html) дата обращения: 26.05.2020
10. [http://ejustice.cnews.ru/reviews/free/industry2005/articles/integration\\_erp.shtml](http://ejustice.cnews.ru/reviews/free/industry2005/articles/integration_erp.shtml) дата обращения: 26.05.2020
11. <https://doi.org/10.1002/leap.1300>: «Factors influencing the choice of a publication venue in library and information science» // Jongwook Lee, Kiduk Yang, Dong-Geun Oh // First published:22 May 2020
12. Pop C, Cioara T, Antal M, Anghel I, Salomie I, Bertoncini M. Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids. Sensors. 2018; 18(1): 162
13. Buterin V. Ethereum scalability research and development subsidy programs. <https://blog.ethereum.org/2018/01/02/ethereum-scalability-research-development-subsidy-programs/>
14. Project management system. <http://www.advanta-group.ru/about-system/>
15. Slutsky N.G. Peculiarities of management of shipbuilding production // Modern high technology. – 2005. – No. 6. – S. 57–59; URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=23228> (accessed: 05.23.2020).
16. Minchenko, L.V. Systems of automatic design in shipbuilding / L.V. Minchenko, T.A. Kandratova. – Text: direct // Modern trends in technical sciences: materials of the V Intern. scientific conf. (Kazan, May 2017). – Kazan: Buk, 2017 .- S. 73–76. – URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/230/12335/> (date of contact: 05.21.2020).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Осипов Олег Николаевич**, магистрант кафедры «Проектирования и технологии постройки судов», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ») 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5. e-mail: [osipovoleg@bk.ru](mailto:osipovoleg@bk.ru)

**Михеева Татьяна Александровна**, доцент, к.т.н., доцент кафедры «Проектирования и технологии постройки судов», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [MiheevaTA@yandex.ru](mailto:MiheevaTA@yandex.ru)

**Oleg N. Osipov**, student of the Department of «Design and shipbuilding technology», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

**Tatyana A. Mikheeva**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Design and shipbuilding technology», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 29.07.2020 г.

УДК 621.892

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.102>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК ДЛЯ МОТОРНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОЦЕССОВ ИХ ОБРАБОТКИ И СЕДИМЕНТАЦИИ

**А.П. Перекрестов**

*Астраханский Государственный Технический Университет, г. Астрахань, Россия*

**А. Саламех**

*Каспийский институт морского и речного транспорта, г. Астрахань, Россия*

*Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-4652>*

**В.А. Чанчиков**

*Астраханский Государственный Технический Университет, г. Астрахань, Россия*

**И.Н. Гужвенко**

*Астраханский Государственный Технический Университет, г. Астрахань, Россия*

**А.Я. Абубакаров**

*Астраханский Государственный Технический Университет, г. Астрахань, Россия*

*Аннотация. В статье приводятся исследования зависимости седиментационной стойкости твердой составляющей присадки противоизносного действия для судовых дизельных тронковых двигателей внутреннего сгорания от технологических условий ее изготовления. В качестве твердой составляющей выбран модификатор трения – диселенид молибдена, обладающий оптимальными противоизносными свойствами. Рассматривается процесс седиментации данного вещества, стабилизированного в объеме раствора присадки ненасыщенными кислотами, при различном времени ротационного перемешивания и влиянии последующей обработки приготовленного раствора ультразвуком. Исследуется масса твердой составляющей раствора как выпавшей безвозвратно в осадок за различные периоды времени хранения растворов присадки, подвергшихся ротационному перемешиванию и дополнительной ультразвуковой обработке. Установлено рекомендуемое время хранения рассмотренной противоизносной присадки с 10% содержанием диселенида молибдена.*

*Ключевые слова: противоизносная присадка, диселенид молибдена, судовой дизельный двигатель, изнашивание, трибологические поверхности, твердая составляющая, седиментация, ротационное перемешивание, ультразвуковая обработка, цилиндропоршневая группа.*

### Введение

Комплексные присадки для судовых моторных масел, использующихся в дизельных тронковых двигателях судов морского и речного флота, являются важным компонентом, влияющим на изнашивание и ресурс прецизионных пар трения. Среди подобных трибологических пар выделяются по значению детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) – поршневые компрессионные и маслоъемные кольца, а также тронковые поверхности поршней, взаимодействующие с зеркальными поверхностями рабочих цилиндровых втулок. Эти взаимодействующие поверхности («втулка-поршень» или «втулка-поршневое кольцо») сформированы рабочими профилями деталей ЦПГ, которые имеют малую шероховатость и в результате воздействия высоких температур и давлений легко выходят за пределы допустимого износа задолго до прихода данных поверхностей трения в предельное состояние. Нарушение микрогеометрии рабочих профилей поверхностей деталей ЦПГ, совершающих возвратно-поступательное высо-

кочастотное движение, влечет за собой ухудшение экологических параметров двигателя и рост ряда эксплуатационных издержек – увеличение расхода топлива, расхода масла на угар и т.д. [1].

Наиболее значимые механизмы изнашивания деталей ЦПГ тронковых судовых дизелей выражаются в коррозионном износе образующих поверхностей трения, их адгезионном износе с частичным переносом отслоившегося изношенного материала с одной трибологической поверхности на сопряженную с ней, а также в абразивном износе при попадании инородных включений в смазочное масло. Данные механизмы могут действовать как по отдельности, так и совместно в результате трибологической деструкции смазочного масла.

По характеру воздействия на смазочное масло присадки делятся на ряд функциональных видов либо на комплексные пакеты. Среди наиболее часто встречающихся функциональных видов присадок выделяются антиокислительные, противоизносные и вязкостные. «Аварийным» механизмом воздействия на уже изношенные поверхности трения ЦПГ судовых ДВС обладают вязкостные и противоизносные присадки. Данные виды присадок способны модифицировать рельеф изношенных поверхностей трения или уменьшить зазоры в изношенных сопряженных деталях при их сложной кинематике взаимодействия.

Работоспособность и эффективность воздействия противоизносных присадок на изношенные поверхности при создании замещающего рельефа (в особенности, слоистых модификаторов трения) зависит от постоянства их компонентного состава. Слоистые модификаторы трения, применяющиеся в тяжело нагруженных узлах, являются, как правило, твердыми веществами [2-8], которые в своем исходном агрегатном состоянии мало пригодны для эффективного использования в узлах трения ЦПГ. Для насыщения поверхностей трения ЦПГ такой твердой основой как дисульфид молибдена  $MoS_2$ , графит С, диселениды и дисилициды тугоплавких металлов, а также минеральные серпентиниты, требуется частичная разборка ДВС, что в зависимости от его размеров и конструктивно-технологической сложности исполнения влечет за собой значительные издержки эксплуатации судового дизельного двигателя. Кроме того, на ранней стадии исследования, в 60–70-х годах прошлого столетия [2], многие из слоистых модификаторов трения, включая фторопласты получили неоднозначную оценку по стойкости защитного слоя твердой присадки на насыщаемой поверхности трения в узлах реверсивного движения скольжения, а ряд сульфидов ( $MoS_2$ ) и силицидов ( $MoSi_2$ ) оказались непригодны в температурном диапазоне работы подвижных и статических деталей тронковых ЦПГ (220–300°C).

Поэтому для надежной транспортировки таких перспективных твердых основ слоистых модификаторов трения как  $MoSe_2$  (диселенид молибдена) необходимо данные основы оптимально стабилизировать в объеме смазочного масла, использующегося в ДВС. Улучшить распределение твердой основы противоизносной присадки в смазочном моторном масле позволяет введение в состав присадки жидкой стабилизирующей составляющей, замедляющей агломерацию частиц твердой основы на молекулярном уровне и увеличивающей время фактической необратимой седиментации таких частиц в картерную систему смазки.

Количество частиц твердой основы противоизносной присадки, выпавших в осадок или массовая доля твердой основы, безвозвратно отделившейся от жидкого раствора присадки, зависит, прежде всего, от времени ее хранения до использования в объеме смазочного масла. В данной работе проведены исследования зависимости выпадения в осадок твердой составляющей противоизносной присадки на основе диселенида молибдена  $MoSe_2$  в случае хранения присадки в исходном состоянии. Основным выходным показателем экспериментального исследования являлось количество (масса) выпавшей в осадок твердой основы присадки – диселенида молибдена.

## 1. Постановка задачи исследования

В ходе данного экспериментального исследования основной задачей являлось построение теоретической зависимости выпадения в осадок массы твердой основы противоизносной присадки в зависимости от времени ее хранения. В качестве твердой основы выступает диселенид молибдена  $\text{MoSe}_2$ , смешанный в массовом соотношении 10% с раствором стабилизирующих ненасыщенных жирных кислот – олеиновой и стеариновой, смешанных между собой в растворе в пропорции 1/2. Таким образом, противоизносная присадка по своему составу соответствует патентной формуле [9], в которой раскрывается состав противоизносной присадки для судового смазочного масла на основе тугоплавкого диселенида молибдена.

## 2. Ход исследования

Для решения первой задачи исследования изготавливался раствор диселенида молибдена в объеме жирных ненасыщенных кислот – олеиновой и стеариновой. Соотношение (массовое) основных компонентов раствора приведено в таблице 1. Общий объем жидких компонентов раствора (ненасыщенных кислот) составлял  $989,5 \pm 0,05 \text{ см}^3$ . В указанный раствор, тщательно перемешанный до однородного состояния и цвета, в течение 10 минут добавлялось до  $100 \pm 0,01 \text{ г}$  диселенида молибдена.

Таблица 1

Массовые и объемные составляющие приготавливаемого раствора  
противоизносной присадки

Наименование компонента	Химическая формула	Массовая доля, %	Масса, г	Объем, $\text{см}^3$	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
Диселенид молибдена	$\text{MoSe}_2$	10	$100 \pm 0,01$	14,33	$698 \pm 1$
Стеариновая кислота	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	30	$300,05 \pm 0,01$	$319,2 \pm 0,05$	$940 \pm 1$
Олеиновая кислота	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}-$ $\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COO}$	60	$600,08 \pm 0,03$	$670,4 \pm 0,05$	$895 \pm 1$
Итого		100	$1000,13 \pm 0,05$	$1003,5 \pm 0,05$	$995 \pm 1$

Первичный раствор двух кислот без твердого включения перемешивался за указанное выше время в смесительной камере роторно-пульсационной машины РПУ-0,8-55А-2,2 мощностью приводного двигателя 2,2 кВт [10] при частоте вращения ротора мешалки в пределах  $2900 \pm 50$  об/мин. Ввиду практически одинаковой вязкости олеиновой и стеариновой кислот за указанное время было достигнуто получение однородного жидкого раствора кислот светло-желтого цвета. Плотность раствора составляла  $910 \pm 1 \text{ кг}/\text{м}^3$  по ареометру АОН-1 (ГОСТ 18481-81), что соответствует теоретической средней плотности между двумя указанными ненасыщенными кислотами. Плотность каждого жидкого компонента первичного раствора, указанная в таблице 1 до смешивания в объеме РПУ-0,8-55А-2,2, измерялась отдельно с помощью аналогичного погружного стеклянного ареометра при помещении объема отдельной ненасыщенной кислоты в стеклянный мерный цилиндр  $250 \text{ см}^3$  (Н2 кл. ГОСТ 1770-74). Кроме того, были выполнены ареометрические исследования раствора с 10% массового содержания диселенида молибдена, результирующая плотность такого раствора записана в таблице 1 как итоговая. Незамедлительно без остановки приводного двигателя ротора мешалки, после окончания первичного смешивания раствора кислот в смесительной установке РПУ в ее загрузочный бункер (рисунок 1) добавлялся диселенид молибдена массой  $100 \pm 0,01 \text{ г}$ . Указанная масса твердой составляющей противоизносной присадки контролировалась до смешивания с раствором кислот взвешиванием на лаборатор-

ных весах A&D HL-100 с точностью до 0,01 г. При взвешивании в качестве тары использовался мерный стакан 400 см<sup>3</sup> (из стекла ТС по ГОСТ 25336-82).

После загрузки диселенида молибдена в приемный бункер 3 (рисунок 1) установки РПУ-0,8-55А-2,2 в течении 150 минут приготавливались 5 проб растворов с шагом времени перемешивания в 30 минут.

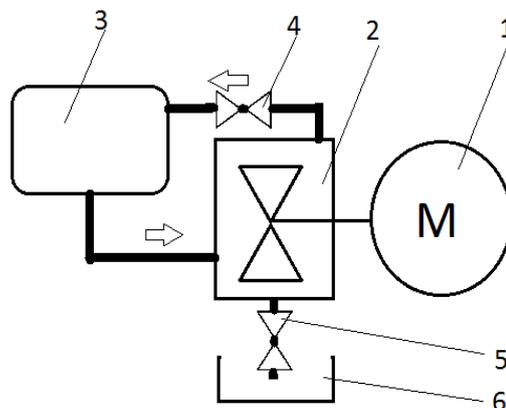


Рис. 1. Схема роторно-рульсационной установки (РПУ) для приготовления раствора и отбора проб растворов (стрелками обозначен путь циркуляции при открытом перепускном кране): 1 – приводной электродвигатель, 2 – смесительная камера с роторной мешалкой, 3 – загрузочный (приемный) бункер, 4 – перепускной кран, 5 – сливной (отборный) кран, 6 – пробоотборник

При перемешивании твердой составляющей присадки в объеме раствора перепускной кран 4 (рисунок 1) между смесительной камерой 2 и бункером 3 в момент загрузки незамедлительно перекрывался. Таким образом, по завершению 30, 60, 90, 120 и 150 минут перемешивания комплексного раствора противоизносной присадки в пробоотборник 6 (рисунок 1) путем открытия сливного крана 5 собиралась проба присадки в объеме  $10 \pm 0,1$  см<sup>3</sup>. В качестве пробоотборника выступали: стеклянная пробирка П-1-10-0,1ХС ГОСТ 1770-74 с печатной градуировкой и стеклянный стакан ГОСТ 25336-82 объемом 400 см<sup>3</sup>. Пробирки использовались для сбора пробы для незамедлительного хранения пяти образцов растворов, стеклянные стаканы для отбора пяти проб растворов для последующей обработки их ультразвуком частотой 43 кГц в погружной ванне. Обработка ультразвуком растворов велась в течении последующих 10 ч. Таким образом, создавалось 10 проб растворов, первые пять из которых были получены ротационным перемешиванием с все возрастающим временем обработки, а другие пять – аналогичным способом обработки, но дополнительно обрабатывались ультразвуком.

Обработка ультразвуком механически перемешанных растворов осуществлялась с целью проверки влияния подобного вида обработки на седиментационную массу твердой составляющей противоизносной присадки. Предполагалась, что ультразвуковое колебание механически перемешанного раствора создаст дополнительные условия для замедления процессов безвозвратной седиментации твердого слоистого модификатора трения – диселенида молибдена в объеме перемешанных кислот.

При последующем хранении 10 полученных экспериментальных растворов соблюдались следующие временные сроки, приведенные в таблице 2.

Предельное время хранения раствора присадки выбиралось исходя из наибольших возможных сроков похода морского судна без захода в порты с целью пополнения судовых запасов (в том числе и горюче-смазочных материалов). При определении временных точек проверки безвозвратно отделившейся массы твердой составляющей противоизносной присадки выбиралась линейная двукратная временная зависимость.

Таблица 2

**Сроки хранения растворов противоизносной присадки и проверки массы отделившейся твердой составляющей раствора диселенида молибдена**

№ п/п	Срок хранения	
	В часах	В неполных сутках
1	1	1
2	2	
3	4	
4	8	
5	16	
6	32	2
7	64	3
8	128	6
9	256	11
10	512	22

Замер массы твердой основы противоизносной присадки в каждой из контрольных точек времени хранения раствора №1-10 по таблице 2 выполнялся по следующей схеме. Пробоотборные пробирки П-1-10-0,1ХС (ГОСТ 1770-74) под №1 в, каждую из которых изначально сливались первые 5 образцов растворов противоизносной присадки из РПУ (или другие 5 образцов после прохождения 10-часового процесса дополнительной обработки ультразвука) отправлялись на первый срок хранения (1 ч). Объем заливаемого раствора в каждую пробирку составлял  $10 \pm 0,1 \text{ см}^3$ . Для корректировки объема заполнения использовался микрошприц МШ-10 (по ТУ 5Е2.833.106) с точностью отбора раствора не менее 10 мкл. После прохождения первого срока хранения из пробирки №1 в течение  $2 \text{ мин} \pm 10 \text{ сек}$  по схеме, приведенной на рисунке 2, ее содержимое гравитационным способом в исчерпывающем объеме (достижение отрыва менее 1 капли раствора за 5 мин нахождения сливаемой пробирки в вертикально перевернутом виде) сливалось в следующую пробирку – № 2 по таблице 2, которая подвергалась следующему временному сроку хранения в 2 раза превышающему предыдущий.

По окончании каждого из сроков хранения вплоть до достижения суммарного срока – 512 ч с каждой из 10 пробирок выполнялись аналогичные действия. Из пробирки №10 по окончании 512 ч хранения раствора содержимое сливалось в аналогичную пробирку для контрольного взвешивания.

До использования пробирок в процессе хранения растворов они взвешивались как пустая тара. При измерении массы твердого отделившегося безвозвратно осадка диселенида молибдена  $\text{MoSe}_2$  использовалось следующее расчетное выражение:

$$m_{\text{ТВ.ОС}} = m_{\text{ИЗМ}} - m_0 \quad (1)$$

где  $m_{\text{ТВ.ОС}}$  – масса твердого осадка, безвозвратно отделившегося от раствора, сливавшегося между двумя пробирками, г;

$m_{\text{ИЗМ}}$  – масса, полученная при измерении после освобождения пробирки от раствора (пустая пробирка + твердый отделившийся осадок), г;

$m_0$  – масса тары (пустой пробирки), г.

Для эксперимента взвешивалось 110 одинаковых пробирок П-1-10-0,1ХС номинальным объемом измерения  $10 \text{ см}^3$ , включая 10 заключительных контрольных. Таким образом, каждый из 10 приготовленных растворов противоизносной присадки последовательно переливался гравитационным способом по схеме, приведенной на

рисунке 2 между 10 пробирками для хранения и 1 контрольной пробиркой в конце эксперимента. Контрольная пробирка служила для оценки цветовой составляющей раствора после прохождения всех временных контрольных точек его хранения в течение 512 ч.

Взвешивание всех 10 промежуточных пробирок для хранения раствора на каждом из временных этапов эксперимента выполнялось с помощью лабораторных весов A&D HL-100 с точностью измерения 0,01 г. Взвешивалась опорожненная пробирка на шагах эксперимента №1-10 и наполненная контрольная пробирка после 512 ч хранения раствора.

При расчете массы твердой составляющей выпавшей в осадок использовалось расчетное выражение (1). При расчете теоретической массы твердой составляющей противоизносной присадки, не подвергшейся седиментационным процессам, за полный срок хранения 512 ч выполнялись следующие действия.

Предварительно, до начала цикла проводимых исследований, были проведены вспомогательные замеры плотности раствора противоизносной присадки при различной массовой доле содержания твердой ее основы – диселенида молибдена  $MoSe_2$ . Ряд растворов с массовым содержанием указанного слоистого модификатора трения в диапазоне от 0 до 10%, были приготовлены на машине трения РПУ-0,8-55А-2,2 и был проведен замер плотности данных растворов. Кривая зависимости плотности от содержания твердой составляющей раствора приведена на рисунке 3.

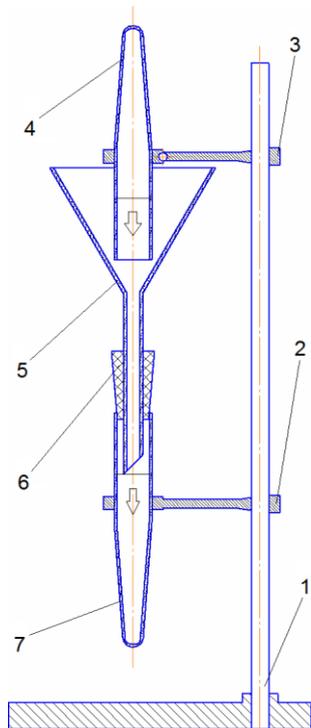


Рис. 2. Схема лабораторной установки для переливания гравитационным способом раствора противоизносной присадки между пробирками (стрелками указано направление движения раствора при переливании): 1 – штатив, 2 – продольно скользящий зажим пробирки, 3 – продольно скользящий шарнирный зажим пробирки, 4 – опорожняемая пробирка, 5 – коническая лабораторная воронка ГОСТ 25336-82, 6 – герметичная резиновая пробка, 7 – наполняемая пробирка

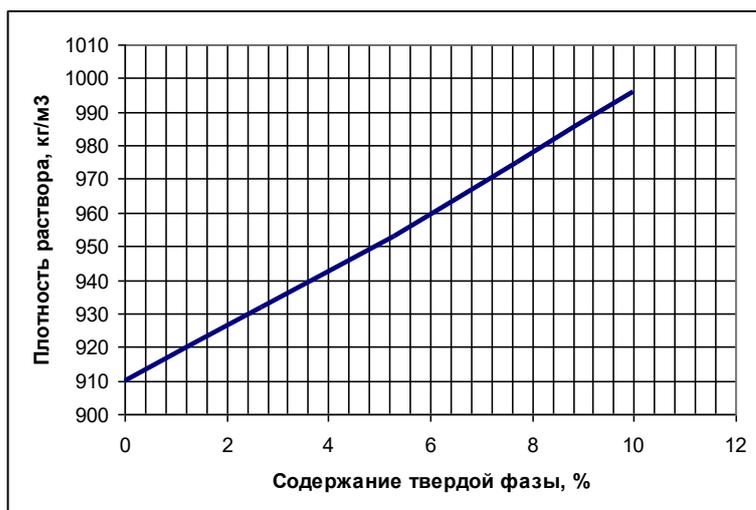


Рис. 3. Эталонная кривая зависимости плотности раствора противоизносной присадки от массового содержания диселенида молибдена

При оценке массы твердой не выпавшей в осадок составляющей раствора проводились действия по расчету плотности каждого из 10 растворов, участвовавших в основном исследовании, получаемых на выходе из проботборного крана установки РПУ. Расчет плотности выполнялся по известному физическому выражению при использовании массы приготовленных растворов:

$$\rho_{p-pa} = (m_{изм} - m_0) \cdot 10^3 / V_{p-pa} \quad (2)$$

где  $\rho_{p-pa}$  – плотность раствора изготовленной противоизносной присадки, кг/м<sup>3</sup>;  
 $m_{изм}$  и  $m_0$  – соответственно массы фактического измерения (масса проботборной пробирки П-1-10-0,1ХС + масса раствора присадки) и пустой пробирки без раствора, г;  
 $V_{p-pa}$  – фактический замеренный объем раствора в проботборной пробирке, л.

Объем раствора замерялся с точностью до 0,1 мл, масса фактического измерения имела точность до 0,01 г.

По результатам нахождения плотности до начала хранения растворов противоизносной присадки, возможно было используя график на рисунке 3 определить примерное массовое содержание диселенида молибдена MoSe<sub>2</sub> в приготовленном растворе. Массовое содержание данного слоистого модификатора трения характеризует, в свою очередь, его теоретическую массу в приготовленном растворе. Соответственно при вычитании из начальной массы твердой составляющей раствора, фактически измеренную массу MoSe<sub>2</sub> в последней из партии из 10 пробирок для каждого образца раствора, возможно было найти теоретическую массу не выпавшей в осадок части твердой составляющей раствора:

$$m_{нс} = m_{теор} - m_{ос} \quad (3)$$

где  $m_{нс}$  и  $m_{ос}$  – соответственно теоретическая не выпавшая в осадок и фактическая безвозвратно осажденная масса твердой составляющей раствора противоизносной присадки, г;

$m_{теор}$  – теоретическая масса содержания твердой составляющей присадки в приготовленном к хранению растворе, г.

Таким образом, по истечению суммарного времени хранения для каждого раствора в объеме 512 ч определялись следующие результаты исследования:

- фактическая масса безвозвратно отделившейся (выпавшей в необратимый осадок) твердой составляющей раствора противоизносной присадки;
- теоретическая масса не выпавшей в осадок (продолжающей присутствовать в взвешенном состоянии в растворе) твердой составляющей;
- конечный цветовой оттенок раствора в контрольной пробирке.

### 3. Результаты исследования

Основные результаты исследования представлены на рисунках 4-6, а также в таблицах 3-4.

В таблице 3 представлены расчетные данные и результаты исследования по выражениям (2) и (3). Это рассчитанная по (2) плотность 10 образцов приготовленных растворов противоизносной присадки [9], соответствующая ей теоретическая масса твердой составляющей раствора – диселенида молибдена, определенная по кривой на рисунке 3.

Таблица 3

**Результаты исследования начальной плотностиготавливаемых растворов и расчета массовых показателей MoSe<sub>2</sub>**

Вид обработки раствора	Начальная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Начальная масса MoSe <sub>2</sub> , г	Конечная (не выпавшая в осадок) масса MoSe <sub>2</sub> , г	Осадок (после 512 ч хранения) MoSe <sub>2</sub> , г
Перемешивание				
150 мин	996	1	0,54	0,46
120 мин	995	0,99	0,45	0,54
90 мин	994	0,98	0,28	0,7
60 мин	993	0,97	0,17	0,8
30 мин	992	0,96	0,05	0,91
Ультразвук	Начальная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Начальная масса MoSe <sub>2</sub> , г	Конечная (не выпавшая в осадок) масса MoSe <sub>2</sub> , г	Осадок MoSe <sub>2</sub> , г
150 мин	995	0,99	0,58	0,41
120 мин	994	0,98	0,49	0,49
90 мин	993	0,97	0,36	0,61
60 мин	992	0,96	0,26	0,7
30 мин	991	0,95	0,09	0,86

Также в таблице 3 приведены конечная масса твердой составляющей раствора после 512 ч его хранения и масса диселенида молибдена, оставшаяся в растворе присадки после данного срока его выдержки в осаждаемом состоянии, рассчитанная по (3). На рисунке 4 приведены кривые зависимости параметра плотности полученных после приготовления растворов от времени их приготовления (для случая ротационного механического перемешивания и для случая дополнительной ультразвуковой обработки).

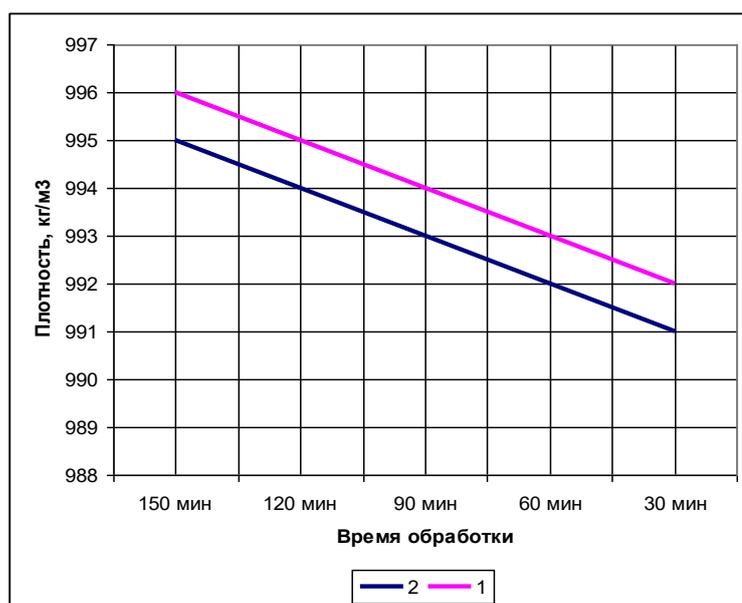


Рис. 4. Графическая зависимость параметра плотности приготовленных растворов при различном времени их начального механического перемешивания: 1 – обработка ротационным перемешиванием, 2 – дополнительная обработка ультразвуком.

В таблице 4 приведены результаты измерения остаточной массы твердой составляющей раствора на каждой временной точке его хранения.

Таблица 4

**Распределение выпавшей в осадок массы твердой составляющей приготовленных растворов, г**

№ этапа и время хранения при виде обработки раствора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Итого
Перемешивание	1 ч	2 ч	4 ч	8 ч	16 ч	32 ч	64 ч	128 ч	256 ч	512 ч	
150 мин	0,06	0,05	0,05	0,08	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,01	0,46
120 мин	0,06	0,06	0,06	0,09	0,05	0,06	0,04	0,06	0,05	0,01	0,54
90 мин	0,1	0,07	0,07	0,1	0,06	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,7
60 мин	0,12	0,08	0,07	0,11	0,06	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,8
30 мин	0,13	0,1	0,11	0,11	0,06	0,08	0,1	0,08	0,08	0,06	0,91
Ультразвук	1 ч	2 ч	4 ч	8 ч	16 ч	32 ч	64 ч	128 ч	256 ч	512 ч	
150 мин	0,05	0,06	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,03	0,04	0,01	0,41
120 мин	0,06	0,07	0,05	0,05	0,04	0,08	0,05	0,03	0,05	0,01	0,49
90 мин	0,07	0,08	0,06	0,09	0,05	0,09	0,06	0,04	0,05	0,02	0,61
60 мин	0,08	0,09	0,08	0,1	0,06	0,09	0,07	0,04	0,05	0,04	0,7
30 мин	0,09	0,13	0,11	0,1	0,06	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,86

Эта масса равна разнице измеренной суммарной массы пробирки с твердым остатком раствора после его гравитационного слива и массы собственно пробоотборной пробирки как тары по (1). Результаты измерений данного массового показателя приводятся для всех 10 образцов растворов как в случае механического перемешивания, так и в случае дополняющей его ультразвуковой обработки. На рисунках 5 и 6 приводится графический вид данных показателей для каждой временной точки хранения.

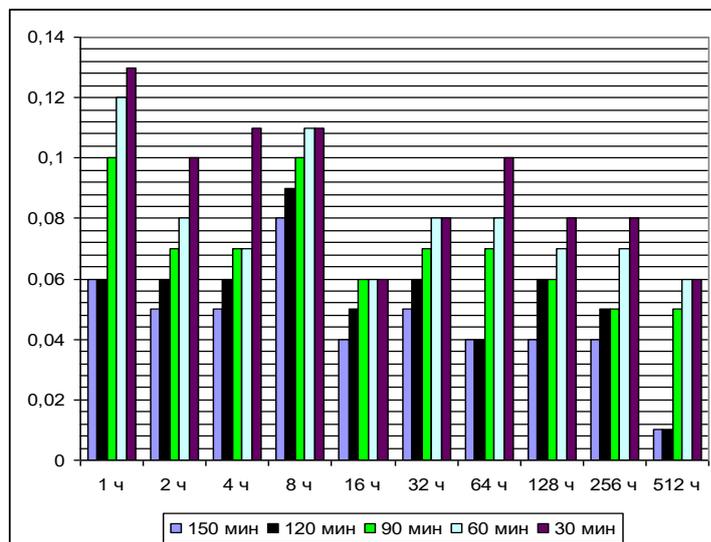


Рис. 5. Графическая зависимость распределения массы, г выпавшей в осадок твердой составляющей раствора противозносной присадки при ротационном механическом перемешивании

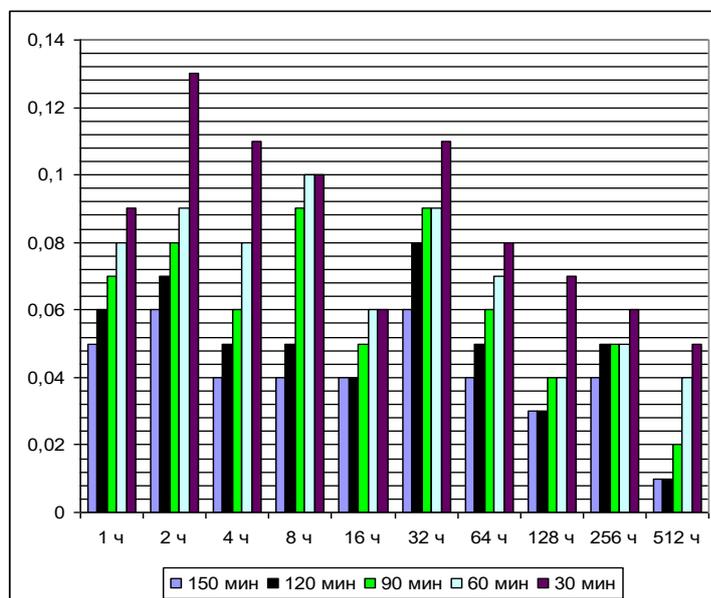


Рис. 6. Графическая зависимость распределения массы, г выпавшей в осадок твердой составляющей раствора противозносной присадки при дополнительной ультразвуковой обработке.

### Выводы по результатам исследования

1. Твердая составляющая раствора противоизносной присадки по [9] имеет ярко выраженный гравитационный механизм выпадения в осадок. Показатель массы твердого слоистого модификатора трения, представленного диселенидом молибдена  $\text{MoSe}_2$ , и неизбежно выпадающая в осадок при хранении, стремится к уменьшению при увеличении времени ротационного перемешивания, а дополнительная ультразвуковая обработка оказывает благоприятное действие на замедление седиментационных процессов твердой составляющей.

2. При оценке эффективности обработки увеличением времени ротационного механического перемешивания раствора выявляется замедление процессов седиментации твердой составляющей в 1,98 раз при сравнении общей осадочной массы для 150 и 30 минут перемешивания и, в среднем в 1,19 раз между отдельными временными этапами обработки. Для растворов присадки, подверженных дополнительной ультразвуковой обработке, замедление седиментации твердой составляющей увеличивается в 2,10 раз для сравнения наибольших временных шагов изначального механического перемешивания и, в среднем, 1,21 раз между отдельными временными этапами механической обработки.

3. Седиментационные процессы для твердой составляющей раствора противоизносной присадки замедляются в, среднем, в 1,14 раз при сравнении временных интервалов механической обработки для ротационного перемешивания и дополнительной ультразвуковой обработки.

4. Долевая составляющая общей массы твердой составляющей, выпавшей в осадок для случаев механического перемешивания и ультразвуковой обработки существенно различается по времени хранения приготовленных растворов противоизносной присадки. Так, для механического перемешивания раствора до 50–60% массы диселенида молибдена выпадает в осадок уже после 16 часов хранения растворов. При этом увеличение времени перемешивания в 3–5 раз по сравнению с минимальным 30 минутным интервалом ротационной обработки вызывает ускорение осаждения массы твердой составляющей раствора. Для дополнительной ультразвуковой обработки, напротив, увеличение времени начального механического перемешивания замедляет седиментационные процессы между точками хранения, а 50–60% массы диселенида молибдена безвозвратно выпадает в осадок между 16 и 32 часами хранения.

5. Плотность приготовленных растворов практически не изменяется на момент извлечения их из ротационной установки по сравнению с начальной плотностью раствора противоизносной присадки с массовым содержанием 10% диселенида молибдена. Максимальное расхождение показателя плотности согласно графикам на рисунке 4 составляет 4–5  $\text{кг/м}^3$  и несколько зависит от времени начальной механической обработки раствора. Также ультразвуковая обработка несколько снижает плотность раствора.

6. Ультразвуковая обработка позволяет увеличить количество не выпадающей в осадок твердой составляющей раствора противоизносной присадки по сравнению с исключительно механической обработкой ротационным способом. Так, в случае ротационного перемешивания расхождение между долей теоретической массы диселенида молибдена, оставшимся в растворе составляет 4,8–54% в зависимости от временного интервала начального перемешивания, а тот же показатель для дополнительной ультразвуковой подготовки составляет 9,0–58,5%.

7. Цветовой оттенок между растворами присадки на момент их приготовления не отличался существенно и соответствовал насыщенному черному цвету. Это свидетельствует о поглощении значительной доли твердой составляющей – диселенида молибдена. Однако после 32–64 ч хранения растворов проявилась начала проявляться осветленная фаза, примерно на половине столба раствора жидкости, находившегося в пробирке. При хранении 512 ч значительная часть раствора (более 3/4 столба жидко-

сти в пробирке) значительно осветлилась, но не достигла исходного светло-желтого цвета, который соответствует смешанному раствору стеариновой и олеиновой насыщенных кислот в их массовом соотношении согласно [9]. Цвет раствора после 512 ч хранения соответствовал светло-серому, что говорит о расслоении основной гидрофазы раствора от большей части твердой составляющей, укрупнении в размерах ранее измельченных частиц диселенида молибдена и ускорении седиментационных процессов в растворе присадки.

8. Замедление и снижение доли седиментационных процессов, относящихся в растворе противоизносной присадки к твердой составляющей для ультразвуковой обработки возможно объяснить более интенсивным и эффективным измельчением пластичных частиц диселенида молибдена  $\text{MoSe}_2$  под действием ультразвука средних частот.

9. Замедление седиментационных процессов для твердой составляющей при хранении присадки при возрастающем времени ротационной обработки перемешиванием раствора возможно объяснить более тщательным измельчением частиц диселенида молибдена, совершающих значительно большее число вращательных движений относительно оси ротора смесительной установки РПУ и закручивающихся движений вокруг своей собственной молекулярной оси.

10. Выбранные режимы ротационной обработки растворов противоизносной присадки с помощью установки РПУ-0,8-55А-2,2, такие, как частота вращения смесительного ротора, отсутствие циркуляции в напорном контуре установки и время начальной обработки измельчением – вполне удовлетворяют требованиям к сохранению противоизносной присадки в состоянии полной готовности к применению в картерных системах смазки судовых тронковых двигателей. Однако рекомендованное время ротационного перемешивания раствора присадки по [9] должно составлять не менее 90–150 минут, а единовременная разовая загрузка компонентов раствора не должна превышать 1 кг массы. Несоблюдение этих показателей может отразиться на снижении времени сохраняемости присадки.

11. Рекомендуемое время хранения рассмотренной противоизносной присадки с 10% содержанием диселенида молибдена составляет 16–32 ч, после чего раствор необходимо вторично перемешивать. Однако даже после 12–22 суток судового автономного похода большая часть твердой составляющей раствора присадки (особенно в случае дополнительной ультразвуковой обработки) успешно остается во взвешенном состоянии и способно транспортироваться к смазываемым поверхностям трения судового двигателя, повышая эффективность защиты трибологических поверхностей.

#### **Список литературы:**

1. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета, испытаний / С.В. Путинцев // М.: МГТУ им. Н. Баумана, 2011. – 288 с.
2. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения / Б.Д. Воронков // Л.: Машиностроение, 1968. – 140 с.
3. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам / А.М. Кулиев // Л.: Химия, 1985. – 312 с.
4. Долгополов К.Н. Структура смазочных слоев, формирующихся при трении в присутствии присадок минеральных модификаторов трения / К.Н. Долгополов, Д.Н. Любимов, А.Г. Пономаренко, Г.Г. Чигаренко, М.В. Бойко // Трение и износ. – 2009. – Т. 30. – №5. – С. 516–521.
5. Марченко Е.А. О механизме изнашивания диселенида молибдена / Е.А. Марченко // Трение и износ. – 2000. – Т. 21. – №4. – С. 438–443.
6. Лобова Т.А. Взаимодействие поверхностей трения со смазочными материалами типа  $2\text{H-MoS}_2$  / Т.А. Лобова, Е.А. Марченко // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – №4. – С. 391–398.
7. Марченко Е.А. Использование диселенидов тугоплавких металлов для обеспечения стабильности работы узлов трения / Е.А. Марченко, Т.А. Лобова // Вестник научно-технического развития. – 2009. – № 5(21). – С. 16–21.

8. Ващенко А.В. Серпентиниты в триботехнике / А.В. Ващенко, В.В. Казарезов, И.В. Таловина, В.В. Костенко // Аналитические идеи, методы, технологии. – 2002. – №1. – С. 43–50.
9. Пат. 2570643 Российская Федерация, МПК С10М 169/04, С10М 125/22 / Противоизносная присадка. А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов, В.А. Чанчиков, И.Н. Гужвенко, С.А. Свекольников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «АГТУ» – заявл. 22.07.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34. – 5 с.
10. Гужвенко И.Н. Исследование влияния дисперсности слоистых модификаторов трения на противоизносные свойства смазочных материалов / И.Н. Гужвенко, В.А. Чанчиков, А.П. Перекрестов, С.А. Свекольников, О.В. Бурмистрова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. – №1(2). – С. 187–192.

## A STUDY ON OPERATIONAL PROPERTIES OF ANTI-WEAR ADDITIVES FOR MOTOR LUBRICATING OILS DEPENDING ON THEIR PROCESSING AND SEDIMENTATION

**Arshavir P. Perekrestov**

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

**Salamekh Ali**

*Caspian Institute of Sea and River Transport, Astrakhan, Russia*

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-4652>

**Vasiliy A. Chanchikov**

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

**Ivan N. Guzhvenko**

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

**Abdullahi I. Abubakarov**

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

*Abstract. The article presents studies on the dependence of sedimentation resistance of the anti-wear additive solid component for marine diesel trunk-type internal combustion engines on the technological conditions of its manufacturing. A friction modifier, molybdenum diselenide, which has optimal anti-wear properties, was selected as a solid component. The authors consider the process of sedimentation of a given substance, stabilized in the volume of an additive solution with unsaturated acids, at different times of rotary stirring, and under the influence of subsequent treatment of the prepared solution with ultrasound. The mass of the solution solid component is studied as irretrievably precipitated over various periods of storage time of the additive solutions, subjected to rotary stirring and additional ultrasonic treatment. The recommended storage time of the considered anti-wear additive with a 10% content of molybdenum diselenide has been established.*

*Keywords: anti-wear additive, molybdenum diselenide, marine diesel engine, wear, tribological surfaces, solid component, sedimentation, rotary stirring, ultrasonic treatment, cylinder and piston group.*

### References:

1. Putintsev S.V. Mechanical losses in piston engines: special chapters of design, calculation, testing / S.V. Putintsev // M.: MSTU im. N. Bauman, 2011. – 288 p.
2. Voronkov B.D. Dry friction bearings / B.D. Voronkov // L.: Mechanical engineering, 1968. – 140 p.
3. Kuliev A.M. Chemistry and technology of additives for oils and fuels. – 2nd ed., Rev. – L.: Chemistry, 1985. – 312 p.
4. Dolgoplov K.N. The structure of lubricating layers formed during friction in the presence of additives of mineral friction modifiers / K.N. Dolgoplov, D.N. Lyubimov, A.G. Ponomarenko, G.G. Chigareno, M.V. Boyko // Friction and Wear. – 2009. – Т. 30. – No. 5. – P. 516–521.
5. Marchenko E.A. About the wear mechanism of molybdenum diselenide / E.A. Marchenko // Friction and Wear. – 2000. – Т. 21. – No. 4. – P. 438–443.

6. Lobova, T.A. Interaction of friction surfaces with lubricants of the 2H-MoS<sub>2</sub> type / T.A. Lobova, E.A. Marchenko // Friction and Wear. – 2008. – Т. 29. – No. 4. – P. 391–398.
7. Marchenko E.A. The use of diselenides of refractory metals to ensure the stability of the friction units. Marchenko, T.A. Lobova // Bulletin of scientific and technical development. – 2009. – No. 5 (21). – P. 16–21.
8. Vashenok A.V. Serpentinities in tribotechnics / A.V. Vaschenok, V.V. Kazarezov, I.V. Talovina, V.V. Kostenko // Analytical ideas, methods, technologies. – 2002. – No. 1. – P. 43–50.
9. Pat. 2570643 Russian Federation, МПК S10M 169/04, S10M 125/22 / Antiwear additive. A.P. Perекrestov, Yu.N. Drozdov, V.A. Chanchikov, I.N. Guzhvenko, S.A. Beetroot; applicant and patentee FGBOU VPO «AGTU» – app. 07.22.2014; publ. 10.12.2015, Bul. No. 34. – 5 p.
10. Guzhvenko I.N. Investigation of the influence of the dispersity of layered friction modifiers on antiwear properties of lubricants / I.N. Guzhvenko, V.A. Chanchikov, A.P. Perекrestov, S.A. Bekolnikov, O.V. Burmistrova // News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – Т. 18. – No. 1 (2). – P. 187–192.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Перекрестов Аршавир Петрович**, к.т.н., доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика» Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ»)

414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
pap1943@rambler.ru

**Саламех Али**, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»

Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ»)  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
a.salameh@mail.ru

**Чанчиков Василий Александрович**, к.т.н., преподаватель ФСПО Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ»)

414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
bazelius87@mail.ru

**Гужвенко Иван Николаевич**, ассистент кафедры «Техника и технологии наземного транспорта» Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ»)

414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
ivan.3124@yandex.ru

**Абубакаров Абдуллахи Ярогиевич**, к.п.н., доцент кафедры «Техника и технологии наземного транспорта» Астраханского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «АГТУ»)

414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
nice.natali92@mail.ru

**Arshavir P. Perекrestov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

**Ali Salameh**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of "Shipbuilding and energy complexes of marine technologies", Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

**Vasiliy A. Chanchikov**, Candidate of Technical Sciences, teacher of the FSPE of the Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

**Ivan N. Guzhvenko**, Assistant of the Department of Engineering and Technology of Land Transport, Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

**Abdullahi Y. Abubakarov**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering and Technologies of Land Transport, Astrakhan State Technical University 16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056

Статья поступила в редакцию 28.07.2020 г.

УДК 629.526

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.103>

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОДЕСНЫХ ЛОДОЧНЫХ МОТОРОВ

**М.Н. Покусаев**

*Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия*

**К.Е. Хмельницкий**

*Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия*

**А.А. Кадин**

*Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия*

*Аннотация: Шум, образующийся на корпусе лодки в результате воздействия вибрации подвесных лодочных моторов, является актуальной проблемой, так как негативно воздействует на экипаж судна и на окружающую среду.*

*Воздушный шум можно снизить при помощи капотирования, а структурный шум – при помощи виброизоляции. В качестве технического решения для виброизоляции можно предложить использование виброизолирующих накладок между трубцинами, прижимной пластиной подвесного мотора и транцем лодки. Сегодня существуют жесткие накладки на транец, которые предотвращают повреждение корпуса лодки от вворачивания трубцин, но это не предотвращает распространение вибрации от мотора. В своем исследовании мы попытались оценить эффективность применения различных по конструкции виброизолирующих транцевых накладок. Экспериментально установлено, что применение для подвесного лодочного мотора «SEA PRO 5.0» накладки из резины марки БК-2045 с толщиной 5 мм максимально снижает шум на 11,2 дБА (11,4%), применение многослойной накладки толщиной 4,5 мм, дает снижение шума на 24,2 дБА (24,5 %), что говорит о перспективности подобных разработок.*

*Ключевые слова: шум, вибрация, маломерное судно, подвесной лодочный мотор, виброизоляция.*

### Введение

Снижение уровня шума и вибрации подвесных лодочных моторов является сложной и в то же время актуальной инженерной и экологической задачей. На сегодня изучение шума двигателей внутреннего сгорания различного назначения рассматривается в работах Шатрова М.Г.: [1], Руссинковского В.С.: [2], Krisztina Uzuneanu, Ion V. Ion: [3], David A. Bies, Colin H. Hansen: [4] и других. Шум и вибрация подвесных лодочных моторов нормируются рядом документов: Технический регламент таможенного союза ТР ТС 026/2012 «О безопасности маломерных судов» [5]; ГОСТ 28556-2016 «Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности» [6]; ГОСТ 17.2.4.04-82 «Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Нормирование внешних шумовых характеристик судов внутреннего и прибрежного плавания» [7]; также превышение шума моторов является правонарушением согласно статье 8 Кодекса РФ об административных правонарушениях [8]. Измерение уровня воздушного внешнего шума подвесных лодочных моторов производится в соответствии с ГОСТ ИСО 14509-1:2008 «Суда малые. Измерение распространяющегося по воздуху звука, производимого моторными прогулочными судами. Часть 1. Методика измерения внешнего шума», [9], а измерение локальной вибрации на румпеле управления согласно ГОСТ 31192.1-2004 «Вибрация. Измерение локальной вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования», [10].

Для оценки эффективности применения виброизолирующих транцевых накладок были проведены испытания на открытой воде, на реке Волга. В качестве испытуемого объекта была взята металлическая моторная лодка с длиной 3400 мм и шириной 1230 мм, оснащенная популярными одноцилиндровыми подвесными лодочными моторами «SEA PRO 2.5», «SEA PRO 5.0» китайского производства, имеющими по отзывам из открытых источников повышенную вибрацию и шум. Повышенная вибрация вышеуказанных моторов связана с тем, что двигатели, имеющие одноцилиндровую конструкцию, не имеют достаточную компенсирующую маховую массу из-за не всегда оправданной борьбы производителей за уменьшение веса и размеров моторов.

### **Цель и новизна исследования**

Целью исследования являлось проведение сравнительных испытаний по снижению шума подвесных лодочных моторов при помощи виброизоляции. Для этого был проведен практический эксперимент с подвесными лодочными моторами марок «SEA PRO 5.0» и «SEA PRO 2.5» в условиях реальной эксплуатации в акватории река Волга.

### **Основные объекты для эксперимента**

Предыдущие исследования кафедры «Эксплуатация водного транспорта» Астраханского государственного технического университета в области снижения шума подвесных лодочных моторов привели к созданию ряда моделей капотов, но в процессе экспериментов было выявлено, что шум возникает не только от работы подвесного мотора, но и от вибрации, передаваемой через жесткое крепление от мотора к лодке, в связи с чем было принято решение подойти к проблеме снижения уровня шума комплексно – как с точки зрения воздушного, так и структурного шума. В ходе решения этой проблемы была создана транцевая виброизолирующая накладка в виде пятислойной конструкции. Наружным слоем является прорезиненная ткань УНКЛ-3, которая представляет собой капроновую основу с каучуковой пропиткой. Подобную ткань используют при производстве ПВХ лодок, рыбацких сапог и общевойсковых защитных комплектов химической защиты ОЗК. Следующий слой выполнен из прозрачного силиконового герметика, который накладывался поверх УНКЛ-3. Герметик обладает следующими свойствами: стойкостью к внешнему воздействию (что очень важно в местах крепления струбцин подвесного мотора); способностью к деформации (что позволит транцевой плоской накладке плотно прилегать к поверхности транца лодки); устойчивостью к ультрафиолетовому излучению и воздействию агрессивных горюче-смазочных материалов; устойчивостью к перепадам температур от  $-50^{\circ}$  до  $+300^{\circ}$  C (что повышает его эффективность в условиях эксплуатации рабочей температуры двигателя); нейтральностью к появлению плесени и бактерий (так как транцевые доски изготавливаются из биологического материала: дерева, фанеры и т.д.). После высыхания герметика, был наложен слой металлической сетки с шириной ячейки 0,04 мм, выполненной из нержавеющей стали марки 08X17H13M2T. Сетка была применена для армирования конструкции транцевой наклейки и для формирования эффекта «запоминания» формы транца, что облегчает работу при многократном демонтаже подвесного мотора с транца. На армирующую сетку далее был нанесен слой силиконового герметика, который сверху был покрыт тканью УНКЛ-3. После этого, транцевая накладка была помещена под пресс для высыхания. Таким образом, транцевая накладка с общей толщиной 4,5 мм состоит из слоев: прорезиненной ткани УНКЛ-3 с толщиной 0,5 мм; силиконового герметика с толщиной 1,5 мм; армирующей металлической сетки с толщиной 0,5 мм; силиконового герметика с толщиной 1,5 мм, прорезиненной ткани УНКЛ-3 с толщиной 0,5 мм.

Моторная лодка для испытаний подвесных лодочных моторов имеет фанерный транец с толщиной 40 мм.

Для экспериментов использовались следующие подвесные лодочные моторы:

1. «SEA PRO 5.0» со следующими техническими характеристиками:

- тип двигателя: двухтактный карбюраторный;
- мощность двигателя: 5 л.с.;
- масса: 25 кг.

2. «SEA PRO 2.5» со следующими техническими характеристиками:

- тип двигателя: двухтактный карбюраторный;
- мощность двигателя: 2,5 л.с.;
- масса: 10 кг.

Для работы обоих моторов использовалась смесь бензина АИ-92 по ГОСТ 32513-2013 «Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия» [11] с маслом «Yamalube2» в пропорции 1/50.

Виброизолирующие устройства, используемые для проведения эксперимента:

- разработанная транцевая многослойная вибронакладка;
- резино-техническое полотно марки БК-2045.

### Контрольно-измерительные приборы

Основные измерения шума производились при помощи комплекса «Экофизика-110А», трехканального виброметра-шумомера, анализатора спектра, предназначенного для оценки вибрации и шума, внесенного с номером 48433-11 в Госреестр средств измерения РФ. Согласно паспорту ПКДУ.411000.001.02ПС на измерительный комплекс «Экофизика-110А» [12], при использовании прибора в качестве шумомера достигаются следующие технические характеристики: класс 1 по МЭК 61260; наименование встроенного программного обеспечения: EPH-V; набор фильтров: октавные, 1/3-октавные фильтры; номинальные среднегеометрические частоты октавных фильтров: 1; 2; 4; 8; 16; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000 Гц; погрешность измерения: 0,4 дБ; минимальный уровень измеряемого шума: 22 дБА; максимальный уровень измеряемого шума: 139 дБА. В состав измерительного комплекса также входит микрофонный преусилитель P200 [13], акустический калибратор АК-1000 [14], микрофонный капсюль ВМК-205: [15], программное обеспечение «Signal +».

Измерение вибрации производилось при помощи портативного виброметра модели AR63A с основными техническими характеристиками виброметра: диапазон измерения виброскорости: от 0,1 до 1999,9 мм/с; диапазон измерения виброперемещения: от 0,001 до 1,999 мм; диапазон измерения виброускорения: от 0,1 до 199,9 м/с<sup>2</sup>; частотный отклик виброускорения: 10 Hz – 1 KHz (LO), 1 KHz – 15 KHz; частотный отклик скорости / перемещения: 10 НКz – 1 КHz; погрешность: ± 5%, ± 2 цифры.

Также применялся вспомогательный шумомер «Uniontest» SM135, который имеет следующие технические характеристики: четырехразрядный цифровой дисплей; динамический диапазон: 30~130 дБ; частотный диапазон: 31,5 Гц ~ 8,5 кГц; диапазон измерений: 30–130 дБ; основная погрешность: ±1,5 дБ (при уровне звука 94 дБ, 1 кГц); разрешение: 0,1 дБ.

Скорость ветра при измерениях шума измерялась анемометром Union GM8901 с погрешностью не более 3%.

### Процедура проведения эксперимента

Перед проведением испытаний была произведена оценка условий окружающей среды: скорость ветра не превышала 1,1 м/с; дождь и иные осадки отсутствовали; высота речной волны в районе испытаний не превышала 0,1 м; температура воздуха +30 °С.

Разница между уровнем измеренного шума и уровнем фона (49,1 дБА) составила более 10 дБА, что является допустимой величиной, поэтому корректировка результатов испытаний не требовалась. Перед и после проведением испытаний шумомер «Экофизика-110А» подвергался калибровке по уровню звука 114 дБА при помощи

виброкалибратора и погрешность составила не более 0,44%, поэтому результаты могут быть признаны достоверными.

Микрофон основного и дополнительных шумомеров располагались в кормовой части лодки на уровне органов слуха рулевого, управляющего румпелем подвесного лодочного мотора. Измерения проводились на следующих режимах работы подвесных лодочных моторов: холостой, малый, средний, полный ход для следующих вариантов установки подвесного лодочного мотора: без виброизолирующих накладок, с виброизолирующей многослойной накладкой, с резиновой накладкой.

### Результаты эксперимента

Обработанные при помощи методов математической статистики и программного обеспечения «Signal +» результаты измерений уровня шума подвесных лодочных моторов «SEA PRO 2.5» и «SEA PRO 5.0» представлены в таблицах 1 и 2 и в виде графиков на рисунках 1 и 2. Следует отметить, что у подвесного лодочного мотора «SEA PRO 2.5» не предусмотрен режим холостого хода.

Таблица 1

Результаты экспериментов с подвесным лодочным мотором «SEA PRO 2.5»

Режим работы	С многослойной накладкой	Без демпфирования	С резиновой	С накл., %	С рез., %	С накл., дБА	С рез., дБА
Малый ход	85,2	97	95,2	-12,2	-1,9	11,8	1,8
Средний ход	91,2	98,4	97,3	-7,3	-1,1	7,2	1,1
Полный ход	100,8	103,9	102,7	-3,0	-1,2	3,1	1,2

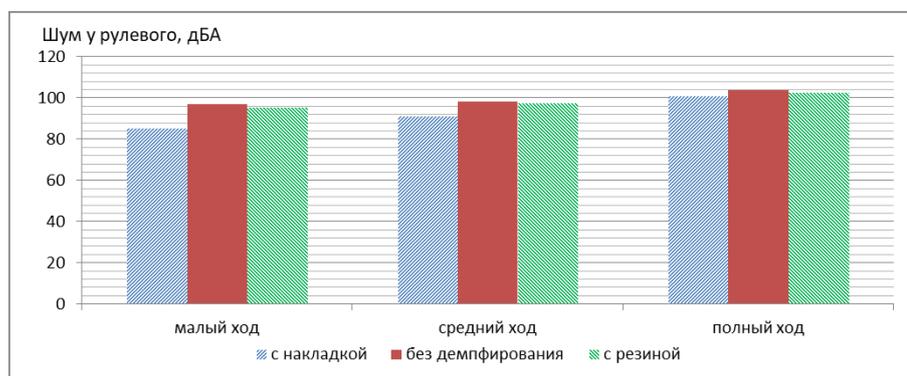


Рис. 1. Результаты экспериментов с подвесным лодочным мотором «SEA PRO 2.5»

Таблица 2

Результаты экспериментов с подвесным лодочным мотором «SEA PRO 5.0»

Режим работы	С многослойной накладкой	Без демпфирования	С резиновой	С накл., %	С рез., %	С накл., дБА	С рез., дБА
Холостой ход	79	97	89,7	-18,6	-7,5	18	7,3
Малый ход	74,4	98,6	87,4	-24,5	-11,4	24,2	11,2
Средний ход	85	102,6	91,5	-17,2	-10,8	17,6	11,1
Полный ход	93,8	105,5	98,8	-11,1	-6,4	11,7	6,7

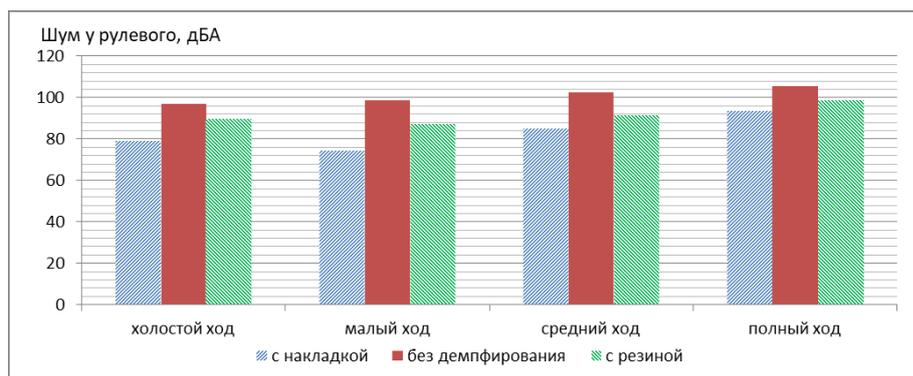


Рис. 2. Результаты экспериментов с подвесным лодочным мотором «SEA PRO 5.0»

### Заключение

Установка виброизолирующих накладок на транец позволяет снизить шум подвесного лодочного мотора. Эффективность виброизоляции для снижения шума уменьшается при росте частоты вращения подвесного лодочного мотора, что можно объяснить снижением его вибрации. Эффективность виброизоляции для мотора с мощностью 5 л.с. выше, чем для мотора с мощностью 2,5 л.с.

Экспериментально установлено, что применение для подвесного лодочного мотора «SEA PRO 5.0» накладки из резины марки БК-2045 с толщиной 5 мм максимально снижает шум на 11,2 дБА (11,4%), применение многослойной накладки толщиной 4,5 мм с резиной и силиконовым слоем, дает снижение шума на 24,2 дБА (24,5 %).

Результаты эксперимента говорят о перспективности подобных разработок на водном транспорте. Следует отметить, что применение многослойных накладок на транец требует проведение дальнейшего анализа на предмет нахождения оптимальной толщины для обеспечения эффективного снижения шума и сохранения надежности крепления мотора на транце.

### Список литературы:

1. Моделирование двигателя внутреннего сгорания как источника акустического излучения. Яковенко А.Л., Микерин Н.А., Глазков А.О., Кузнецов С.М., Шатров М.Г. В сборнике: Волны и вихри в сложных средах 9-ая международная конференция – школа молодых ученых. Сборник материалов школы, 2018. с. 184 – 187.
2. Руссинковский В.С. Разработка метода расчета вибрации и структурного шума корпусных деталей автомобильных дизелей: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / В.С. Руссинковский. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 182 с.
3. Krisztina Uzuneanu, Ion V. Ion. Impact of noise and vibrations on the ship microclimate // Proceedings of the 3rd International Conference of Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development (TE-RE-RD 2014), Mamaia – Romania, 12-14 June 2014, – 4 s.
4. David A. Bies, Colin H. Hansen. Engineering Noise Control: Theory and Practice, Fourth Edition, 2009. – 745 s.
5. Технический регламент таможенного союза ТР ТС 026/2012. О безопасности маломерных судов, 2012. – 38 с.
6. ГОСТ 28556-2016. Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2016. – 8 с.
7. ГОСТ 17.2.4.04-82. Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Нормирование внешних шумовых характеристик судов внутреннего и прибрежного плавания. М.: Стандартинформ, 2004. – 5 с.
8. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях. Текст с последними изменениями и дополнениями на 1 октября 2018 года. М.: Эскмо, 2018. – 544 с.
9. ГОСТ ISO 14509-1-2015. Суда малые. Измерение шума малых моторных прогулочных судов. Ч. 1. Измерение шума проходящего судна. М.: Стандартинформ, 2016. – 19 с.

10. ГОСТ 31192.1-2004. Вибрация. Измерение локальной вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2010. – 24 с.
11. ГОСТ 32513-2013. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.
12. Шумомер-вибромметр, анализатор спектра «Экофизика-110А». Паспорт ПКДУ. 411000.001.02ПС. «ПКФ Цифровые приборы». М., 2014. – 12 с.
13. Паспорт формуляр на микрофонный предусилитель Р200. ООО «ПКФ Цифровые приборы». М., 2018. – 4 с.
14. Паспорт на калибратор акустический АК-1000. ООО «ПКФ Цифровые приборы». М., 2015. – 8 с.
15. Протокол испытаний капсуля микрофонного конденсаторного ВМК-205, №6115. М., 2017. – 1 с.

## **EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF VIBRATION-INSULATING DEVICES USE FOR OUTBOARD MOTORS**

**Mikhail N. Pokusaev**

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

**Konstantin E. Khmel'nitsky**

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

**Aleksey A. Kadin**

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

*Abstract: Noise generated on the boat hull, as a result of outboard motors vibration, is an urgent problem as it negatively affects the ship's crew and the environment.*

*Air noise can be reduced by cowling, and structural noise can be reduced by vibration isolation. As a technical solution for vibration isolation, the use of vibration-insulating pads between the clamps, the outboard motor pressure plate and the boat transom can be offered. Today, there are rigid transom linings preventing damage to the boat's hull from screwing in the clamps, but this does not prevent motor vibration spreading. In our study we tried to evaluate the effectiveness of using various vibration-insulating transom linings. It has been experimentally established that the use of an outboard motor «SEA PRO 5.0» lining made of 5 mm rubber BK-2045 reduces noise by 11.2 dBA (11.4%), the use of a 4.5 mm multi-layer lining gives a noise reduction of 24.2 dBA (24.5 %), which indicates the prospects of such developments.*

*Keywords: noise, vibration, small vessel, outboard motor, vibration isolation.*

### **References:**

1. Modeling of the internal combustion engine as a source of acoustic radiation. Yakovenko A.L., Mikerin N.A., Glazkov A.O., Kuznetsov S.M., Shatrov M.G. in the collection: Waves and vortices in complex environments 9th international conference-school of young scientists. Collection of school materials, 2018. pp. 184-187.
2. Russinkovsky V.S. Development of a method for calculating vibration and structural noise of body parts of automobile diesels: dis. on competition of a scientific degree Cand. tech. V. S. Russinkovsky, Moscow: Bauman Moscow state technical University, 2005, 182 p.
3. Krisztina Uzuneanu, Ion V. Ion. Impact of noise and vibrations on the ship microclimate // Proceedings of the 3rd International Conference of Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development (TE-RE-RD 2014), Mamaia – Romania, 12-14 June 2014, – 4 s.
4. David A. Bies, Colin H. Hansen. Engineering Noise Control: Theory and Practice, Fourth Edition, 2009. – 745 s.
5. Technical regulations of the customs Union TR CU 026/2012. On the safety of small vessels, 2012, 38 p.
6. GOST 28556-2016. Outboard boat motors. General safety requirements. Moscow: standardinform, 2016. – 8 p.

7. GOST 17.2.4.04-82. Nature protection (SSOP). Atmosphere. Normalization of external noise characteristics of inland and coastal vessels. Moscow: standardinform, 2004. – 5 p.
8. the Code of administrative offences of the Russian Federation. Text with the latest changes and additions as of October 1, 2018. Moscow: Eskmo, 2018. – 544 p.
9. GOST ISO 14509-1-2015. Small vessels. Measuring the noise of small motor pleasure craft. Part 1. Measuring the noise of a passing vessel. Moscow: standardinform, 2016. – 19 p.
10. GOST 31192.1-2004. Vibration. Measurement of local vibration and assessment of its impact on a person. Part 1. General requirements. Moscow: standardinform, 2010. – 24 p.
11. GOST 32513-2013. Motor fuels. Unleaded petrol. Technical conditions. Moscow: standardinform, 2014. – 12 p.
12. noise Meter-vibrometer, spectrum analyzer «Ekofizika-110A». Passport PKDU.411000.001. 02 PS. «PKF Digital devices», Moscow, 2014, 12 p.
13. Passport form for microphone preamp P200. LLC «PKF Digital devices». Moscow, 2018. – 4 p.
14. Passport for the AK-1000 acoustic calibrator. LLC «PKF Digital devices». Moscow, 2015. – 8 p.
15. test Report of the microphone condenser capsule VMK-205, no. 6115. M., 2017. – 1 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Покусаев Михаил Николаевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация водного транспорта», Астраханский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «АГТУ»),  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: evt@astu.org

**Mikhail N. Pokusaev**, doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department «Operation of water transport», Astrakhan state technical University (AGTU),  
16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056  
e-mail: evt@astu.org

**Хмельницкий Константин Евгеньевич**, аспирант кафедры «Эксплуатация водного транспорта», Астраханский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «АГТУ»),  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: chuchera80@mail.ru

**Konstantin E. Khmel'nitsky** postgraduate student of the Department «Operation of water transport», Astrakhan state technical University (AGTU),  
16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056  
e-mail: chuchera80@mail.ru

**Кадин Алексей Алексеевич**, магистрант кафедры «Эксплуатация водного транспорта», Астраханский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «АГТУ»),  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: alexeik1@mail.ru

**Aleksey A. Kadin** master's student of the Department «Operation of water transport», Astrakhan state technical University (AGTU),  
16, Tatishchev st., Astrakhan, 414056  
e-mail: alexeik1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.07.2020 г.

## **Раздел II**

**Экономика, логистика, управление  
на транспорте**



## **Section II**

***Economics, logistics and transport  
management***



УДК 656:613

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.104>

## **ИНТЕРМОДАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕВОЗОК ГРУЗОВ НА ПАРОМАХ: СОВРЕМЕННЫЙ АСПЕКТ**

**В.К. Калачев**

*Волжский государственный университет водного транспорта,*

*г. Нижний Новгород, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4910-2281>*

**М.В. Карташов**

*Каспийский институт морского и речного транспорта, г. Астрахань, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9580-3006>*

*Аннотация. В статье приводится понятие интермодальной технологии, рассматриваются типы паромных переправ, их преимущества и недостатки; дается описание материально-технической базы перевозок грузов на паромов, конструктивных особенностей судов-паромов, приведена технология погрузки, перевозки и выгрузки вагонов и автомобилей. Снижение дальности перевозок и сокращение времени грузовых работ позволяют повысить эффективности перевозок грузов на паромов по сравнению с перевозкой этих же грузов с многочисленными перевалками с одного вида транспорта на другой. История развития паромных линий в России и за рубежом подчеркивает важность такого вида перевозок. В России история перевозок грузов на паромов считается с конца XIX века. В бывшем СССР работало пять паромных линий. В статье рассмотрены такие линии, как Керченская между Крымом и Кавказом и через Татарский пролив – Ванино-Холмск. Подробно рассмотрено развитие перевозок грузов в постсоветский период в Балтийском и Каспийском бассейнах. В таблице приводится анализ объемов перевалки грузов, перевозимых на паромов, по основным морским бассейнам России. История развития паромных линий в Европе началась с середины XIX века в Шотландии и Ирландии. Наибольшее развитие перевозок накатных грузов было получено в государствах Балтийского бассейна. Развиваются такие перевозки также в Японии и США и других странах.*

*Ключевые слова: интермодальные технологии, транспортно-технологическая система, паромы, паромные переправы, паромная линия, конструктивные особенности, аппарат, накатные грузы.*

### **Введение**

Интермодальные перевозки – это современная и развивающаяся технология перевозки грузов несколькими видами транспорта без перегрузки самого груза в процессе передачи его с одного вида транспорта на другой. Суть этой технологии заключается в перевозке судами типа РО-РО (паромов) подвижного состава железнодорожного транспорта, автомобилей и другой колесной техники. Кроме того, на судах такого типа могут перевозиться и пассажиры [1,2].

### **Материалы и методы**

Для преодоления водных преград паромные переправы человечество использовало достаточно давно, речные паромы перевозили людей и гужевого транспорт. С развитием промышленного производства и возникновением различных видов транспорта паромные технологии также стали совершенствоваться [3]. На паромов стали перевозить железнодорожные вагоны, грузовые и легковые автомобили, другую колесную технику, пассажиров. Паромная транспортно-технологическая система может называться железнодорожно-водной, если на пароме перевозятся груженные и порожние

вагоны, автомобиле-водной, если перевозятся автомобили или комбинированной, если перевозятся вагоны и автомобили одновременно. В зависимости от того, какие транспортные средства перевозятся на паромах, так и называются паромные переправы: железнодорожные, автомобильные, универсальные (железнодорожно-автомобильные). В случае, если на пароме, кроме перечисленных транспортных средств, перевозятся и пассажиры, то такие переправы называются грузопассажирскими [4,5].

В работе паромных переправ имеются преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести:

- продолжительность грузовой обработки паромов значительно меньше, чем грузовых судов, что сокращает время доставки грузов, а в ряде случаев уменьшает расстояние перевозки и снижает время простоев судов и вагонов;

- ввиду отсутствия перегрузки груза с одного вида транспорта на другой снижаются финансовые затраты доставки груза и обеспечивается более высокая его сохранность;

- сокращается и упрощается документооборот в процессе доставки груза от отправителя до потребителя.

Недостатки при перевозке грузов на паромах следующие:

- строительство причалов для грузовой обработки паромов требует более высоких капитальных вложений чем для грузовой обработки грузовых судов;

- для функционирования паромной переправы требуется более сложное причально-подъемное оборудование на судне и в порту, а в случае колебаний уровня моря у причала строится бассейн, оборудованный шлюзом для его выравнивания;

- грузоподъемность парома примерно в два раза меньше грузовых судов при одинаковом водоизмещении за счет того, что совместно с грузом перевозятся также вагоны и автомобили.

Отмеченные преимущества являются более важными и существенными и несмотря на недостатки перевозки грузов на паромах получают свое развитие. Паромные переправы будут эффективными в случае, если дальность и объем перевозок будут оптимальными и стабильными. Если рассматривать доставку грузов от грузоотправителя до конечного потребителя, то перевозки грузов на паромах являются более экономичными по сравнению с обычными морскими перевозками. При использовании паромных переправ значительно сокращается время грузовой обработки судов в портах (пропускная способность одного паромного причала сопоставима с двенадцатью сухогрузными причалами), сокращаются затраты на перевалку грузов и повышается их сохранность [6,7].

Первоначально груз перевозится на автомобиле или вагоне, а затем, если это необходимо, эти транспортные средства закатываются на паром для их дальнейшего транспортирования. Для функционирования паромной железнодорожной переправы требуется технически сложное оборудование. Для повышения устойчивости на ряде паромов железнодорожные вагоны перевозятся на нижних палубах. В процессе погрузки они с помощью лифтов опускаются на нижние палубы, а в процессе выгрузки поднимаются наверх для дальнейшего перемещения на берег. Кроме того, паромы оборудуются площадкой для перевозки автомобилей. Автомобили могут перевозиться на палубе отдельно от вагонов или совместно, но при этом они чаще всего располагаются вдоль бортов такой палубы. Береговые устройства паромного причала оборудуются железнодорожными путями для накопления необходимого количества вагонов, автомобильной площадкой, и автомобильными дорогами. В процессе погрузки вагонов или автомобилей происходит их расстановка на пароме. Это выполняется двумя способами: подача их на паром по аппаратам (устройство в виде пологой площадки) или с использованием лифтов. Процесс погрузки и выгрузки колесной техники в отдельных случаях может включать одни ворота на въезд на паром, другие на выезд из парома [8]. Процесс выгрузки автомобилей из скандинавского морского парома «Европа» типа «Силья Лайн» (рис. 1).

Конструкция паромов имеет свои особенности, они могут быть одно-, двух-, трехпалубными и более. В отдельных случаях на борту для выполнения маневровых работ могут быть локомотивы. На большинстве типов паромов одновременно с перевозкой вагонов и автомобилей могут перевозиться пассажиры. Так, например, немецкий паром «Карл Карстенс» при общей длине 165 м принимает на борт до 1500 пассажиров, 156 и 27 легковых и грузовых автомобилей соответственно или 14 пассажирских вагонов.



Рис. 1. Иллюстрация выгрузки автомобилей из морского парома

Конструктивные особенности таких паромов предусматривают размещение пассажиров на верхних палубах, а железнодорожные вагоны, автомобили и другой накатный груз на нижних. Заезд колесной техники осуществляется с помощью специальных устройств, называемых кормовыми и носовыми рампами, а также через специальные бортовые отверстия – лацпорты.

Горизонтальный способ погрузки или выгрузки вагонов или автомобилей на паром позволяет сократить затраты, связанные с указанными операциями, а следовательно снизить простои, перевозимой на паромов колесной техники и самого парома, а также способствует совершенствованию механизации портовых работ [9]. Такие технологии стали широко применяться также для перевозки пассажиров и багажа, автобусов и легковых автомобилей. Аналогичная технология была применена для переправы туристов из Крыма в Краснодарский край и обратно через Керченский пролив. Несмотря на высокие капитальные затраты применение паромов для перевозки колесной техники весьма эффективно, срок окупаемости паромных переправ составляет 13–17 лет. Считается, что эффективная протяженность паромных линий должна быть не менее 1000 км, а это подтверждается мировой практикой их эксплуатации. Провозная способность паромной переправы зависит от грузоподъемности и грузместимости парома, времени следования между причалами и времени погрузки-выгрузки [10, 11].

Конструкция речных паромов проще, чем морских, т.к. условия плавания на реке значительно легче чем в море. Для движения паромов на несудоходных реках применяются тяговые лебедки и канаты, на широких судоходных используются буксирные суда, моторные катера или самоходные паромы. Для причаливания паромов используются пристани или баржи площадки, закрепленные у берега. И в том и другом случае строятся подъездные пути.

Впервые речной железнодорожный паром в России начал эксплуатироваться в 1886 году у г. Саратова, а в 1903 году начала действовать железнодорожная паромная

переправа через озеро Байкал для соединения двух станций Транссибирской железнодорожной магистрали. Паромы этой линии могли перевозить 27 двухосных вагонов 150 пассажиров.

Ввиду более сложного оборудования и инфраструктуры на берегу морские паромы появились значительно позднее. Seriously этим вопросом в Советском Союзе начали заниматься с 1952 года. Морские паромные линии, эксплуатируемые в СССР с 1955 по 1986 годы (табл. 1).

Таблица 1

**Морские железнодорожные паромные переправы в бывшем СССР**

Наименование, год ввода в эксплуатацию	Протяженность, мили/км	Типы паромов	Число паромов, штуки	Вместимость паромов, число вагонов
Керченская, 1955 г.	2,4/4,45	ж/д – пассажирский вагон	«Южный», 4	24
Каспийская (Красноводск – Баку), 1963 г.	193/357	ж/д – пассажирский вагон – автомобиль	«Советский Азербайджан» – 5, «Советский Дагестан» – 8	30
Ванино – Холмск, 1973 г.	137/254	ж/д – пассажирский вагон	«Сахалин» – 9	26
Ильичевск – Варна, 1978 г.	265/491	ж/д вагон	«Герои Шипки» – 4	108
Клайпеда – Мукран, 1986 г.	273/506	ж/д вагон	«Мукран» – 3	103

Чтобы сократить расстояние перевозки грузов между Крымом и Кавказом, в 1955 году через Керченский пролив была организована железнодорожная переправа. На паромов этой переправы могли перевозиться как железнодорожные вагоны и автомобили, так и пассажиры. Расстояние перевозки грузов с использованием паромов сокращается на 1000 километров. Изначально на этой переправе работало 4 паромов типа «Южный», последний паром был списан в 1966 году. В 1975 году специально для этой переправы был построен автомобильный паром типа «Керченский». В 2004 году была вновь открыта паромная линия между Крымом и Кавказом. После присоединения Крыма к России в 2014 году на линии Крым-Кавказ работало 6 разнотипных паромов. Мощность Керченской переправы после проведения дноуглубительных работ и реконструкции причальных сооружений была доведена до 50 тыс. пассажиров, 10 тыс. легковых автомобилей и 1 тыс. грузовых в сутки [12]. После введения в строй Крымского моста актуальность паромной переправы резко снизилась и она осталась как дублер моста, в основном для большегрузных автомобилей и отдельных пассажиров.

Для улучшения снабжения жителей о. Сахалин в 1973 году через Татарский пролив начала работать паромная переправа Холмск-Ванино, протяженность которой 394 км. В настоящее время на линии работает 3 паромов типа «Сахалин». Ледокольные паромы этого типа могут перевозить 26 четырехосных вагонов, они оборудованы железнодорожными путями длиной 420 м. Всего за период с 1972 года по 1992 год было построено 10 паромов такого типа, 7 из них выработали ресурс и были списаны. Ввиду того, что потребность в перевозках грузов для снабжения о. Сахалин и в обратном направлении неуклонно растет, в настоящее время решается вопрос о строительстве новых паромов для этой линии. В 1963 году была открыта переправа между Баку и Красноводском. На этой линии работало 5 паромов типа «Советский Азербайджан» и 8 типа «Советский Дагестан». На паромов этого типа можно перевозить 30 железнодорожных вагонов, автомобили и пассажиры, протяженность линии 357 км. В

1973 году были начаты перевозки железнодорожных вагонов на паромов линии Ильичевск-Варна. Линию длиной 518 км обслуживали 4 паромов типа «Герои Шипки» вместимостью 108 вагонов.

После распада СССР в России осталась одна Сахалинская переправа. Чтобы изменить сложившуюся ситуацию с февраля 1997 года были начаты перевозки в Европу и из Европы автомобилей, грузовиков, автопоездов, полуприцепов или любого другого накатного груза, а также пассажиров на паромов из Санкт-Петербурга в Германию. Паромную линию «Trans Russia Express» обслуживают два современных судна повышенной грузоподъемности и вместимости. Между Россией и Швецией в 1997 году была открыта паромная линия Санкт-Петербург (пос. Бронка)-Укселесунд. Ранее перевозки грузов осуществлялись через Эстонию и Финляндию. Прямые перевозки из России в Швецию позволили сократить расстояние на 400–600 км [15]. Расчетная пропускная способность порта в пос. Бронка составляет 2,83 млн. тонн груза в год. В 2006 году открыто прямое паромное сообщение между российскими портами Усть-Луга и Балтийск, а в дальнейшем эта линия была продлена до немецкого порта Засниц. На линии Усть-Луга (пос. Бронка)-Балтийск-Засниц работают паромов вместимостью 49 железнодорожных вагонов и 50 автофур. В 2010 году были начаты регулярные перевозки грузов в Санкт-Петербург из европейских портов на паромов компании Finnlines, а с 2012 года суда этой компании стали заходить в порт Усть-Луга два раза в месяц из портов Валхамн (Швеция) и Орхус (Дания) [13,14]. Основные технико-экономические характеристики линии Усть-Луга – Балтийск – порты Европы приведены в табл. 2

*Таблица 2*

**Технико-экономические характеристики паромной линии**

Показатели	Все линии	Линия Усть-Луга – Балтийск – порты Европы
Грузооборот, млн. тонн	10,53	1,94
Число паромов, ед	13	3
Капитальные вложения, млн. \$ США, в том числе:	716,8	399,6
– паромные суда	440,0	165,0
– береговые морские сооружения	191,9	176,9
– железнодорожные устройства	84,9	57,7
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	6,5	13,9

Организация мультимодального паромного сообщения между Россией и Ираном свяжет порты Оля и Бандар Анзали. Кроме указанных портов на этой линии задействованы порт Туркменбаши (Туркмения), что позволит перевозить грузы из Индии, Пакистана и Афганистана в Россию и Европейские страны. На линии должны работать четыре паромов. Провозная способность линии составит 10 тысяч большегрузных автомобилей. Время следования паромов от порта Оля до порта Туркменбаши составит 40–50 часов, а от порта Туркменбаши до порта Бандар Анзали – 20–25 часов. Терминал в порте Оля построен с учетом грузовой обработки паромов, как с бортовой, так и с кормовой аппарелью. Однако стоит отметить, что линия, в настоящее время, не имеет расписания и паромов отправляются по мере накопления грузовой партии.

Объем перевозок грузов и пассажиров с использованием паромов в последние годы неуклонно растет. В таблице приведен объем перевалки сухогрузов и грузов на паромов через морские порты России за 9 месяцев 2019 года в сравнении с аналогичным периодом 2018 года (табл. 3) [14].

Таблица 3

**Объем перевалки грузов в морских портах России за 9 месяцев 2019 года**

Объем перевалки сухогрузов, всего, тыс. тонн					
	Всего	Экспорт	Импорт	Транзит	Каботаж
9 мес. 2018	293026,9	229775,0	26075,0	2713,1	34463,8
9 мес. 2019	280108,1	227091,7	27314,5	3238,3	22463,6
2019/2018, %	95,6	98,8	104,8	119,4	65,2
В том числе грузов на паромов, тыс. тонн					
Балтийский бассейн					
9 мес. 2018	1702,7	-	1,4	-	1701,3
9 мес. 2019	1132,4	13,6	20,5	-	1098,4
2019/2018, %	61,8	-	-	-	64,6
Азово-Черноморский бассейн					
6 мес. 2018	7464,3	3,9	17,4	-	7443,0
6 мес. 2019	1681,0	-	2,7	-	1678,3
2019/2018, %	22,5	-	15,5	-	22,5
Дальневосточный бассейн					
9 мес. 2018	1465,7	-	-	-	1465,7
9 мес. 2019	1856,2	-	-	-	1856,2
2019/2018, %	126,7	-	-	-	126,7
Итого грузы на паромов					
9 мес. 2018	10632,7	3,9	18,8	-	10610,0
9 мес. 2019	4669,7	13,6	23,2	-	4632,9
2019/2018, %	43,9	348,7	123,4	-	43,7
Доля перевалки грузов с участием паромов в общем объеме перевалки сухогрузов, %					
9 мес. 2018	3,63	0,002	0,072	-	30,8
9 мес. 2019	1,67	0,006	0,085	-	20,6

Объем перевалки грузов, перевозимых на паромов: за 9 месяцев 2019 года в общем объеме перевалки сухогрузов составляет менее двух процентов или в два раза меньше чем за этот же период 2018 года. Если за 9 месяцев 2018 года перевалка из паромов была в размере 10632,7 тыс. тонн, то за 9 месяцев 2019 года всего 4669,7 тыс. тонн.

Перевалка грузов, перевозимых на паромов, осуществляется в морских портах России трех бассейнов – Балтийском, Азово-Черноморском и Дальневосточном. В таблице нет данных о перевалке грузов в Каспийском бассейне, вероятно, они включены в группу «накатные грузы» (РО-РО), которые выделены отдельной строкой в других бассейнах и в целом по стране. Объем перевалки грузов, перевозимых на паромов, в Балтийском бассейне за 9 месяцев 2019 года сократился до 61,8%, в Азово-Черноморском – до 22,5%, а в Дальневосточном бассейне вырос и составил 126,7%, во всех бассейнах объем перевалки сократился до 43,9% по сравнению с 9 месяцами 2018 года. Почти весь объем перевалки грузов, перевозимых на паромов, выполняется в каботажном плавании – 99,2%. Перевалка экспортных и импортных грузов составляет менее 1% и совсем отсутствуют транзитные грузы.

В Шотландии в 1851 году была организована первая железнодорожная паромная линия через залив Ферт-оф-Форт Северного моря. Через залив Ферт-оф-Тей Ирландского моря также в Шотландии была открыта вторая линия. И та, и другая линии про-

существовали недолго. Действующая в настоящее время паромная линия между портами Нюборг и Корсар в Дании через пролив Большой Бельт была открыта в 1883 году. Протяженность этой линии составляет 25 километров. В XX веке перевозка накатных грузов в мире получила широкое распространение. Большинство паромных переправ имеет протяженность не более 200 километров. Исключением являются паромная линия длиной 2000 км, связывающая Канаду и Аляску и линия Сиэтл (США) – Принс Рупер (Канада) протяженностью 2620 км. Длина самой протяженной переправы составляет 1000 километров, соединяющей Европейские порты Травемюнде (Германия) и Ханко (Финляндия). Эта линия была открыта в 1975 году. В 1978 году на Черном море – линия Одесса-Варна протяженностью 500 км. На верфи VEB Mathias-Thesen Werft Wismar в Висмаре (Германия) в 1986 году был построен самый большой морской железнодорожно-автомобильно-пассажирский паром класса Mukran для работы на линии Мукран-Клайпеда протяженностью 506 км. Длина парома – 190,35 м, скорость хода – 18,9 узлов, вместимость – 120 пассажиров, 103-110 стандартных железнодорожных вагонов, 308 автомобилей. В 1995 году паром получил название Petersburg. На пароме при двухпалубном расположении железнодорожных путей отсутствуют подъемные устройства. Погрузка и выгрузка вагонов может осуществляться с двух сторон из верхней и нижней палуб одновременно на причальные пути с помощью железнодорожного моста в два этажа. Ввиду того, что глубины у берега недостаточны для причаливания паромов были построены двухэтажные железнодорожные мосты, которые соединяют причал с берегом. Причал в Мукране расположен в 10,5 км от берега, в Клайпеде в 6 км [15].

В настоящее время по оценке специалистов паромные перевозки относятся к наиболее перспективным на международном рынке транспортных услуг. В последние годы рост этих перевозок составляет 4–5% ежегодно. Наибольшие объемы перевозок грузов на паромов выполняются в Балтийском бассейне. Количество паромных линий на Балтике превышает их число на Северном и Средиземном бассейнах. Это связано с тем, что протяженность линий в этом бассейне значительно короче. На Балтике наиболее развитым портом является Германский порт Любек. Через этот порт задействовано более 10 регулярных паромных сообщений с Данией, Швецией и Финляндией. В этом порту выполняется примерно 81% общего объема переработки грузов портов Балтийского моря [16,17].

С 1924 года начали работать паромные линии между Великобританией и Европой, соединившие ее с Бельгией, а затем в 1967 году с Францией. Линия соединяющая Великобританию с Францией после строительства тоннеля через пролив Ла-Манш была закрыта. В настоящее время в Итальянских портах задействованы три паромные линии.

В Юго-Восточной части земного шара в Японии перевозки грузов на паромов осуществляются через пролив Цугару на линии Аомори-Хокадате, на линии работают 13 паромов. Кроме этой линии через пролив Уно 4 парома работают между портами Уно и Такамацу. Во внутреннем Японском море задействованы три паромные линии, самой протяженной из которых является между портами Нихори и Мацуями длиной 37,9 километра.

На озере Мичиган в США эксплуатируются две железнодорожные паромные переправы. В Африке железнодорожные паромные перевозки между Угандой и Танзанией, Танзанией и Кенией осуществляются через озеро Виктория. Имеются также паромные линии в Южной Америке через озеро Тикикака и через пролив Кука в Новой Зеландии.

### **Заключение**

Темпы роста использования железнодорожных паромов в последние годы несколько снижаются. Это связано, в том числе и с тем, что наряду с грузом на пароме перевозятся и сами вагоны, а их вес значительный, а так же строительство мостов и

тоннелей. В то же время на смену таким перевозкам получают развитие пассажирско-автомобильные. Обеспеченные люди хотят путешествовать и посещать другие страны вместе со своим автомобилем. В последние годы рост таких перевозок составляет в среднем 6%, а это несколько выше чем перевозка легковых автомобилей. Для развития таких перевозок необходимо строительство круизных паромов [18].

#### **Список литературы:**

1. Адрианов А.А. диссертация на тему: Методика построения эксплуатационно-финансового ядра корпоративной информационной системы Ро-Ро.
2. Лимонов Э.Л. Внешнеторговые операции морского транспорта и мультимодальные перевозки. Учебн. Для вузов – СПб. 2006.
3. Бутакова Н.А. Проблемы эволюции мультимодальных перевозок в международной торговле. ж. Управленческое консультирование. №4, 2016.
4. Колик А.В. Комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки в цепях поставок / А.В.Колик. – Москва: изд-во «Техполиграфцентр», 2018 г. – 301с.
5. Кособокова Е.Н. диссертация на тему: Параметры железнодорожных комплексов морских паромных переправ 2005 г.
6. Журавлева Н.А. Экономическая оценка интермодальных эффектов высокоскоростных транспортных систем в экономике нового технологического уклада / Н. А. Журавлева. – Современные технологии транспорту. Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, – 2018. – с. 31–40.
7. Berg, R. Strategies and new business models in intermodal hinterland transport / Berg, van den, R. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2015. – 206 p.
8. Миротин Л.Б., Лебедев Е.А., Федосеев С.М. Развитие транспортно коммуникационных возможностей Юга России // Современный транспорт: инфраструктура, инновации, интеллектуальные системы // Сборник трудов №18 Международной Транспортной Академии материалы конф.) – Москва, 2015. – с. 162–172.
9. Bontekoning, Y. Breakthrough innovations in intermodal freight transport / Y.Botenkoning, H.Premius // Transportation Planning and Technology. – 2010. -27(5), p. 335–345.
10. Стрельникова И.А. Повышение эффективности интермодальных перевозок на базе логистических систем: дис. канд. экон. наук: 08.00.05 / Стрельникова Инесса Анатольевна. – Новороссийск., 2005. – 145 с.
11. Филиппов Е.Е. Повышение эффективности интермодальных перевозок на основе логистического подхода к регулированию информационных потоков: дис. канд. экон. наук: 08.00.05 / Филиппов Егор Евгеньевич. – Москва, 2007. – 140 с.
12. Perkner R. Intermodal Transportation / Perkner Radim. – Union Colledge Scennectady, 2001. – 49 p.
13. Лукинский В.С. Модели и методы интермодальной транспортной логистики: современное состояние и перспективы / В.С. Лукинский, Т.Г. Шульженко, К.А. Соколов, – ИКМ МТМТС, СПб, 2011, – с. 77–82.
14. Обзор перевозок грузов через морские порты России, Балтии, Украины и Финляндии за 9 месяцев 2019 года. Статистика Все грузы России. Морские порты: Информационно-аналитический журнал, №8, 2019, с. 64–71.
15. Wang D. Multi-fleet ferry service network design with passenger preferences for differential services/ David Z. W. Wang, Hong K. Lo// Transportation Research Part B: Methodological. Volume 42, Issue 9 November 2008.-p. 798–822
16. Laird, J.J Valuing the quality of strategic ferry services to remote communities// Research in Transportation Business & Management. Volume 4 October 2012. p. 97–103
17. Konings R. The Future of the Intermodal Freight Transportation. Operations, Design and Policy / Rob Konings, Hugo Premius, Peter Nijkamp. – Edward Elgar. – 2008. – 335 p.
18. Perkner R. Intermodal Transportation. / Perkner Radim. – Union Colledge Scennectady, 2001. – 49 p.

## **INTERMODAL CARGO TRANSPORTATION TECHNOLOGIES ON FERRIES: A MODERN ASPECT**

**Vladimir K. Kalachev**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Maxim V. Kartashov**

*Caspian Institute of sea and river transport, Astrakhan, Russia*

*Annotation. The article provides the concept of intermodal technology, considers ferry types and their advantages and disadvantages; describes the material and technical base of cargo transportation on ferries, design features of ferries, the technology for loading, transporting and unloading of wagons and cars. Reducing the transportation distance and cargo operations time make it possible to increase cargo transportation efficiency on ferries in comparison with transportation of the same cargo with numerous transshipments from one transport type to another. The history of ferry lines development in Russia and abroad emphasizes the importance of type of transportation. In Russia, the history of cargo transportation on ferries is considered to be from the end of the XIX century. There were five ferry lines operating in the former USSR. The article considers such lines as the Kerch line between the Crimea and the Caucasus and the Vanino – Kholmok line through the Tatar Strait. The development of cargo transportation in the post-Soviet period in the Baltic and Caspian basins is considered in detail. The table shows an analysis of the cargo transshipment volume carried by ferries in the main sea basins of Russia. The history of ferry lines development in Europe began in the middle of the XIX century in Scotland and Ireland. The greatest development of ro-ro cargo transportation was achieved in the countries of the Baltic basin. Such transportation is also being developed in Japan, the United States and other countries.*

*Keywords: intermodal technologies, transport and technological system, ferries, ferry crossings, ferry line, design features, ramp, ro-ro cargoes.*

#### **References:**

1. Adrianov A.A. dissertation on the topic: Methods of building the operational and financial core of the corporate information system Ro-Ro.
2. Limonov E.L. foreign Trade operations of sea transport and multimodal transportation. Educational. For universities – SPb. 2006.
3. Butakova N.A. Problems of the evolution of multimodal transport in international trade. g. Management consulting. No. 4, 2016.
4. Koliq, A.V. Rail-road Combined transport in supply chains / A.V. Koliq. – Moscow: publishing house «tehpolograftsent», 2018-301c.
5. Kosobokova E. N. dissertation on the topic: Parameters of railway complexes of sea ferry crossings 2005
6. Zhuravleva N. A. Economic assessment of the effects of intermodal high-speed transport systems of the new technological order in the economy / N. A. Zhuravleva. – Modern transport technologies. Saint Petersburg state University of Railways of Emperor Alexander 1, – 2018. – p. 31-40.
7. Berg, R. strategies and new business models in intermodal domestic transport / Berg, van den, R.-Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2015. – 206 p.
8. Mirotin L. B., Lebedev E. A., Fedoseenko S. M. Development of transport and communication capabilities of the South of Russia.// Modern transport: infrastructure, innovations, intelligent systems.// Proceedings No. 18 of the international transport Academy materials Conf.)- Moscow, 2015. – pp. 162-172.
9. Bontekoning, Y. breakthrough innovations in intermodal freight transport / Y. Botenkoning, H. Premius // transport planning and technologies. – 2010. -27 (5), Pp. 335-345.
10. And Strelnikov.A. improving the efficiency of intermodal transport based on logistics systems: dis. Cand. Econ. science: 08.00.05 / Strelnikova Inessa Anatolyevna. – Novorossiysk., 2005. – 145 p.
11. Filippov E. E. Improving the efficiency of intermodal transport on the basis of a logistics approach to regulating information flows: dis. Cand. Econ. science: 08.00.05 / Yegor Filippov. – Moscow, 2007. – 140 p.
12. Perkner R. Intermodal Transport. / Perkner Radim. – Union Colledge Scennectady, 2001. – 49 p.
13. To Lukinsky.C. Models and methods of intermodal transport logistics: current state and prospects./ V. S. Lukinsky, T. G. Shulzhenko, K. A. Sokolov, – ICM mtmts, SPb, 2011, – pp. 77-82.
14. Overview of cargo transportation through seaports of Russia, the Baltic States, Ukraine and Finland for 9 months of 2019. Loads All Of Russia Statistics. Sea ports: information and analytical journal, no. 8, 2019, pp. 64-71.

15. Wang, D. designing a ferry network with multiple fleets taking into account passenger preferences for differentiated services / David Z. V. Wang, Hong K. Lo // transport research part b: methodology. Volume 42, Issue 9 November 2008.- p. 798-822
16. Laird, J. J assessing the quality of strategic ferry services for remote communities // research in the field of transport business and management. Volume 4 October 2012. p. 97-103
17. Konings R. the future of intermodal freight transport. Operation, design and Policy / Rob Koenings, Hugo PREMIUS Peter Nijkamp. «Edward Elgar». – 2008. – 335 p.
18. Perkner R. Intermodal Transport. / Perkner Radim. – Union Colledge Scennectady, 2001. – 49 p.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Калачев Владимир Константинович**, к.т.н., доцент, доцент кафедры экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kvk\_vladimir@mail.ru

**Vladimir K. Kalachev**, Ph.D. in Engineering Science, associate Professor of the Department of Economics and management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Карташов Максим Вячеславович**, заместитель директора по учебной работе, Каспийский институт морского и речного транспорта, (филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 414024, г. Астрахань, ул. Б. Хмельницкого 3, e-mail: mwkart@gmail.com

**Maxim V. Kartashov**, Deputy Director for academic Affairs, Caspian Institute of sea and river transport, 3, B. Khmel'nitsky st., Astrakhan, 414024

Статья поступила в редакцию 24.03.2020 г.

УДК 656.6

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.105>

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА В ГОРОДЕ АЛМАТЫ**

**Ж.К. Кегенбеков**

*Казахстанско-Немецкий Университет, г.Алматы, Казахстан*

**А.Ж. Конгуева**

*Казахстанско-Немецкий Университет, г.Алматы, Казахстан*

**Н.М. Сапрыкина**

*Казахстанско-Немецкий Университет, г.Алматы, Казахстан*

*Аннотация. В статье рассматриваются возможности формирования уникального транспортно-логистического кластера (ТЛК) в Казахстане.*

*Цель работы: выполнить структурно-функциональный анализ инфраструктуры, выявить узкие места логистики, а также предложить меры по оптимизации транспортно-логистических процессов. В статье обозначены главные задачи, функции и структура ТЛК. Обоснована важность постоянного развития логистических систем для увеличения доли Республики Казахстан в транзитных потоках. Научная новизна заключается в получении оригинальных результатов. Ожидается, что создание ТЛК приведет к повышению конкурентоспособности Казахстана на мировом рынке, оптимизации сервисного обслуживания товаропотоков, развитию логистической инфраструктурной системы, сокращению времени транспортировки и к созданию новых рабочих мест. В случае успешной реализации кластерного подхода в Алматы появятся условия для эффективного функционирования отраслевых кластеров и в других городах Республики Казахстан.*

*Ключевые слова: кластер, ритейл, стейкхолдер, транзитный потенциал, интеграция, цифровизация, венчурные инвестиции, логистика.*

### **Введение**

В последнее время на мировом логистическом рынке прослеживается тенденция перехода от отраслевого управления территориями к кластерному. В условиях рыночной экономики при кластерном подходе приоритет отдается развитию определенной территории, что должно привести государство к повышению конкурентоспособности в регионе.

У Казахстана, как у участника глобальных транспортных проектов, существуют возможности зарекомендовать себя в качестве эффективно развивающегося, транзитного хаба Центральной Азии. У города Алматы, как у самого развитого во всех сферах города страны, есть перспективы стать первым в РК транспортно-логистическим кластером.

Таким образом, внедрение кластерного подхода в транспортно-логистическую систему Казахстана является актуальной задачей.

### **Материалы и методы исследования**

Методологической базой для написания статьи послужили SWOT-анализ, сравнение, прогнозирование, метод обобщения и систематизации результатов исследований.

В настоящей работе были использованы материалы государственных статистических архивов, панельных дискуссий, конференций, отраслевых журналов, а также работы зарубежных и отечественных исследователей.

### **Обсуждение и результаты**

Одной из самых известных работ, посвящённых теории кластеров, считается монография М. Потера. Согласно его теории, кластеры играют стратегическую роль в экономике, так как, по сути, ТЛК представляют собой точки роста внутреннего рынка [1].

Среди отечественных исследователей, посвятивших свои работы изучению и решению проблем транспортно-логистических кластеров, следует отметить Раимбекова Ж.С., Сыздыкбаеву Б.У., Дулатбекову Ж.А., Матаева Т.М. Работы М. Портера, Гриценко С.И., Месняковой Л.А., Евтодиева Т.Е также учитывались при написании работы [2,3].

Меньшенина И.Г в своем исследовании утверждает, что транспортно-логистический кластер создаст новые условия для эффективного функционирования промышленности в области материально-технического снабжения и каналов распределения продукции [4].

Обычно в стране или регионе, где уже существует кластер, создаются новые кластерные группы, что, в свою очередь, оказывает синергетический эффект на экономику.

Таким образом, международная конкурентоспособность страны на международном уровне растёт. Следовательно, без кластерного подхода даже самая развитая экономика характеризуется слабыми экономическими результатами.

### **Исследование теории кластеров**

Кластер – это группа географически соседствующих, взаимосвязанных компаний, таких как: поставщики, производители и другие, связанные с ними организации, например, образовательные заведения, органы государственного управления, инфраструктурные компании, действующие в определенных сферах и взаимодополняющие друг друга [5].

Простыми словами, это неформальное объединение множества однородных фирм в единую систему, обладающую синергетическим эффектом.

Понятие «кластер» применимо не только к экономике, но и к науке, технологиям, производству и сфере услуг [6].

Несмотря на то, что особый интерес к кластерам возник относительно недавно, теоретическое изучение, систематизация и практическое применение кластерного подхода началось еще в конце XIX-го века [7].

Альфред Маршалл и Майкл Портер считаются экономистами-исследователями, благодаря которым появилось понятие «кластер». Сегодня ученые всего мира заинтересованы изучением и практическим применением теории кластеров.

Кластер, в отличие от технополисов и территориально производственных комплексов (ТПК), представляет собой усовершенствованную форму организации производственного процесса с вовлечением инвестиций, государственных структур, научного сообщества, ВУЗов и других организаций [8].

Транспортно-логистический кластер классифицируется как разновидность отраслевого кластера.

Помимо роста экономики, кластеры вносят изменения в социальную сферу. Процент трудоустроенных граждан растёт, возникают свободные вакансии и формируются новые специальности.

В Казахстане есть возможности применить данную теорию на своих внешних и внутренних рынках.

### **Предпосылки к образованию кластера в Казахстане**

Вопрос о модернизации инфраструктуры и технических процессов был всегда важен для Республики Казахстан. Выгодное географическое положение и транзитный потенциал создают предпосылки к возможности независимого и конкурентоспособ-

ного положения в регионе. Это, в свою очередь, подразумевает наличие транспортно-логистического кластера.

Существует целый ряд государственных программ, которые, в той или иной степени, способствуют образованию транспортно-логистического кластера.

Это программы «Нұрлы жол», «Цифровой Казахстан», «Новый Шелковый Путь», «Национальная экспортная стратегия Республики Казахстан», «Казахстан 2050» [9, 10, 11, 12].

Данные программы призваны улучшить экономическую и социальную инфраструктуру, что приведет к ускорению формирования ТЛК.

#### **Анализ инфраструктуры железнодорожного транспорта**

В казахстанской транспортной системе железнодорожный комплекс является важнейшим элементом инфраструктуры, сформировавшимся за счёт развития приоритетных секторов государственной экономики [13].

Общая протяженность железных дорог Казахстана составляет около 16614,3 км, из которых 6 тысяч являются двухпутными, а к электрифицированным путям относятся 5 тысяч. Развёрнутая длина главных путей равна 18,8 тыс. км, а станционных и специальных – 6,7 тыс. км [14].

В Казахстане насчитывается 1192 железнодорожные станции. Из них 73 располагаются в Алматинской области [15].

По сравнению с 2018-м годом, грузооборот за 2019-й год вырос на 2,2%, составив 609,341 млрд. тонно-километров (далее т/км) [16].

На долю грузооборота железнодорожного транспорта приходится 289,174 млрд. т/км. Таким образом, по состоянию на 2019 год, доля грузооборота железнодорожного транспорта равна 47,5% [16].

#### **Анализ инфраструктуры автомобильного транспорта**

На сегодня лидирующее положение в сфере транспортно-логистических услуг занимает автотранспорт.

Перед Казахстаном в транспортном секторе стоят задачи по увеличению числа транзитных перевозок, развитию современной инфраструктуры и внедрению зеленых технологий.

Грузооборот автотранспорта в 2019 году составил 182,695 млрд. т/км, что превышает прошлогодний показатель на 5,8%. Доля автотранспорта в общем грузообороте равна 30% [16].

Казахстанская сеть автомобильных дорог общего пользования имеет протяженность 96 353 км. Густота автомобильных дорог РК составляет 31,9 км на 100 кв.км [17].

Через Казахстан проходят пять международных автомобильных маршрутов общей протяженностью 23 тыс. км. Из них 4 осуществляются по территории Алматы:

- Алматы – Нур-Султан – Костанай – выход на Челябинск;
- Алматы – Петропавловск с выходом на Омск;
- Алматы – Семей – Павлодар (трасса М – 38) с выходом на Омск;
- Алматы – Шымкент (трасса А2) с выходом на Ташкент [17].

По итогам 2019 года в Казахстане около 87% республиканских и 68% местных автомобильных дорог находятся в удовлетворительном состоянии.

#### **Анализ инфраструктуры воздушного транспорта**

Сегодня в Казахстане находится 35 аэропортов, которые делятся на аэропорты международного и регионального значения [18].

Казахстанские аэропорты еженедельно обслуживают 2 935 рейсов. Из общего количества рейсов, 1 952 приходится на авиaperевозки внутри Казахстана. Оставшаяся часть рейсов, осуществляется по направлениям: Азия, Европа, Ближний Восток [19].

Самым большим аэропортом Казахстана является Международный аэропорт Алматы, который имеет статус хаба [20].

В настоящий момент, АО «МАО» обслуживает 32 пассажирских и 7 грузовых авиакомпаний. В среднем, за сутки реализуется 157 рейсов. Пропускная способность пассажирского терминала достигает 1 600 пасс/час.

Данный вид транспорта имеет большие перспективы в рамках развития транспортно – логистического кластера.

Развитая система авиатранспорта усиливает синергетический эффект глобализации, стимулирует развитие туризма и рост экономики.

### **Анализ инфраструктуры трубопроводного транспорта**

Недра Казахстана богаты огромными запасами нефти и газа. Для транспортировки углеводородов в РК используется система магистральных трубопроводов.

Трубопроводный транспорт Казахстана представлен газопроводами и нефтепроводами. Общая протяжённость магистральных трубопроводов достигала 23,3 тыс. км, две трети из которых составляли газопроводы (15,3 тыс. км) [21].

Согласно данным АО «КазТрансГаз», на сегодня в эксплуатации находится более 19 тыс. км магистральных газопроводов, годовая пропускная способность которых, достигает 224 млрд. куб [21].

За первое полугодие 2019 года объём реализации товарного газа составил 11,6 млрд. куб. м, в том числе объём реализации газа на внутренний рынок – 7,3 млрд. куб. м, на экспорт – 4,3 млрд. куб. м [21].

Внутренняя газопроводная система Казахстана поставляет газ только в некоторые регионы республики. В основном, газ транспортируется в Шымкент, Тараз и Алматы. Это связано с тем, что газопроводная система Казахстана связана с газопроводами Узбекистана и Туркменистана.

Наличие данного вида транспорта увеличивает шансы возникновения ТЛК в Алматы.

### **Уникальные транспортные возможности города Алматы**

В городе Алматы представлены уникальные виды транспорта, аналогов которым нет во многих регионах Казахстана.

К уникальным видам транспорта стоит отнести систему метрополитена и общегородской сервис велопроката.

Благодаря этим видам транспорта активно развиваются курьерские службы, а также сервисы онлайн-магазинов.

### **Стратегические объекты логистики**

Государство всячески поддерживает идею кластера. Доказательствами этому служат не только государственные программы, субсидии и льготы, но и особые инфраструктурные объекты.

Надо отметить, что их количество по стране небольшое. И большая часть размещена в пределах южной столицы Казахстана. Такие стратегические объекты, как МЦПС «Хоргос», специальная экономическая зона «Парк инновационных технологий» и самый большой в РК логистический центр «Damu Logistics», способствуют формированию развитой транспортно-логистической инфраструктуры.

Каждый объект уникален. Аналогов нет в других регионах Казахстана и даже в некоторых соседних государствах.

### Исследование рынка логистических услуг

За последние 10 лет в транспортную инфраструктуру Казахстана инвестировано более 30 млрд. долл. США, т.е. более 13 трлн. тенге. На сегодняшний день, логистический рынок РК, эксперты оценивают более чем в 22 млрд. тенге [22].

Сегодня логистический рынок Казахстана развивается стремительно и уверенно. В настоящее время в Казахстане официально насчитывается 6701 транспортно-логистических компаний, большая часть которых, расположена в Алматы [23]. Для наглядности, следует обратиться к диаграмме.



Рис. 1. Диаграмма, показывающая долю логистических компаний по регионам Казахстана

В Алматы находится 2664 логистических компаний, из которых лишь 12 или 0,5% относятся к сектору большого бизнеса, 23 или 0,9% представляют средний бизнес, все остальные компании – малый [23].

Несмотря на большое количество организаций малого бизнеса, предпочтение рынка отдается крупному или среднему бизнесу. В основном, малый бизнес представлен индивидуальными предпринимателями, которые специализируются на определенной деятельности.

### Обзор рынка складской недвижимости

Рынок складской недвижимости в Казахстане является своего рода отражением ритейл–рынка, так как компании–ритейлеры являются основными клиентами логистического сектора [24].

Основные клиенты казахстанских складов – это различные дистрибьюторы, производители пищевой продукции, а также владельцы магазинов розничной торговли [25].

Коэффициент обеспечения населения Казахстана складскими помещениями на 1000 жителей равен 227 кв.м, в то время как в европейских странах данный показатель составляет около 420 кв.м. Разница коэффициентов вызвана различиями в объемах торговли и численности населения. В Европе эти показатели выше [25].

Потенциальная емкость рынка складских помещений оценивается в 7,73 млн. кв. м [25].

Данная информация свидетельствует о том, что в РК существует дефицит складских помещений. Крупные, современные склады размещены лишь в городах республиканского значения.

На склады класса «А» наблюдается повышенный спрос. Поэтому при анализе складской инфраструктуры, данному классу складов уделяется большое внимание.

В 2019 году совокупный объем складских площадей класса «А» составил 562 тыс. кв. м, из которых 426 тыс. кв. м расположены в городе Алматы, 116 тыс. кв. м в Нур-султানে и около 20 тыс. кв. м в Шымкенте [25].

Размещение складов по городам Казахстана в процентном отношении можно увидеть на диаграмме.

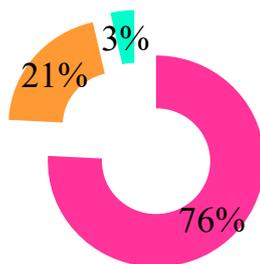


Рис. 2. Диаграмма складов класса «А» в городах Казахстана [36]

Из-за наличия большого числа складских объектов, в городе Алматы, в сравнении с другими городами Казахстана, лучше всего развита сфера питания, оптовых продаж и производство фармацевтической продукции.

Востребованность складских объектов класса «А» объясняется высокими техническими стандартами и возможностью получения спектра таких логистических услуг как: таможенное оформление, разгрузка и сортировка, маркировка и распределения товара по точкам продаж [24].

Меньший спрос замечен по отношению к складам класса «В», «С», «D». Как правило, склады классом ниже заняты строительными или промышленными компаниями, для которых более важны площадь и цена аренды намного важнее, чем температурный режим, вентиляция и другие особые условия [24].

По данным консалтинговой компании «Colliers International», была составлена диаграмма, показывающая объем предложения складов по классам в процентах [24].

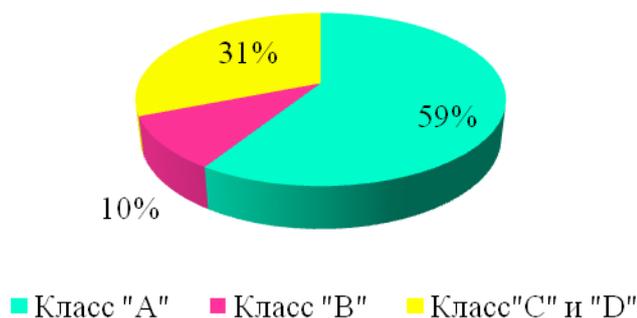


Рис. 3. Диаграмма, отражающая объем предложения складской недвижимости в разбивке по классам в процентном выражении [24]

Как видно на диаграмме, количество предложений складов класса «С» и «D» больше, чем «В». Связано это с тем, что у большинства крупных строительных фирм имеются личные склады.

Преимущественно, складами класса «С» и «D» пользуются мелкие подрядчики, владельцы автомастерских.

В заключение, можно утверждать, что современные складские комплексы Казахстана в большей степени удовлетворяют потребности внутреннего рынка РК, но не участвуют в обслуживании транзитных потоков.

### **SWOT-анализ к формированию ТЛК в городе Алматы**

Для верной оценки возможностей образования транспортно-логистического кластера в Алматы стоит обратиться к SWOT-анализу.

SWOT-анализ представляет собой анализ сильных и слабых сторон проекта или организации, в зависимости от случая, а также возможностей и угроз.

Для изучения возможностей образования ТЛК в Алматы SWOT -анализ имеет управленческую и стратегическую ценность. Анализ связывает воедино факторы внутренней и внешней среды и дает прогноз о том, какие ресурсы и возможности понадобятся в будущем.

*Таблица 1*

**SWOT- анализ проекта транспортно-логистического кластера в городе Алматы**

Сильные стороны	Слабые стороны
Наличие квалифицированных кадров; Доступ к программам финансирования; Наличие особой инфраструктуры; Выгодное географическое положение; Развитая инфраструктура; Высокая концентрация транспортно-логистических предприятий; Государственная поддержка развития инфраструктуры; Развитый курьерский сервис; Доступ к рынкам сбыта; Вовлеченность научного сообщества в логистику; Наличие свободных территорий	Непрозрачность некоторых логистических процессов; Отсталость прилегающих к Алматы территорий; Дефицит современных складов; Малая вовлеченность в процесс обработки транзитных потоков; Отсутствие кооперации логистическими предприятиями; Отсутствие многофункциональных транспортно-логистических узлов; Перебои в работе логистических информационных систем
Возможности	Угрозы
Автоматизация логистических процессов; Обработка транзитных потоков; Интеграция участников логистического бизнеса; Оптимизация логистических затрат; Переход к новым стандартам качества предоставления сервиса; Образование новых рабочих мест; Развитие новых направлений логистики; Увеличение поступлений в государственный бюджет; Создание эффективной сети распределения; Применение полученного опыта в регионах Казахстана.	Технологическая неразвитость; Нестабильность геополитической ситуации; Колебания национальной валюты; Высокая конкуренция со стороны иностранных логистических компаний; Незащищенность информации; Загрязнение окружающей среды; Несоответствие ожиданий

## Выводы

В международной транспортно-коммуникационной системе Казахстан занимает важное место. Через территорию РК проходят важнейшие автомобильные, железнодорожные и воздушные коридоры международного значения [26].

Уровень и темпы роста социально-экономического развития страны во многом зависят от особенностей состава и структуры национальной экономики.

Сегодня такие факторы, как территориальная структура национальной экономики и степень вовлеченности в мировые интеграционные процессы, формируют прогрессивную национальную систему и отраслевую структуру экономики [27].

Оптимизированная транспортно-логистическая система, которая будет создана в рамках транспортно-логистического кластера, позволит казахстанским производителям продуктов питания, машин и любых других, развивающихся отраслей промышленности, незамедлительно найти потребителей на зарубежных рынках.

Кластер будет способствовать возникновению новых учебных заведений, где будет формироваться современный класс специалистов, обладающих актуальными знаниями и необходимыми навыками для работы в современном мире. Однако для этого необходимо устранить проблемы, описанные в анализе слабых сторон казахстанской логистики.

Учитывая наличие развитой инфраструктуры, для создания транспортно-логистического кластера в городе Алматы имеются все возможности [27].

## Список литературы:

1. Портер М. Конкуренция. – М.: Вильямс, 2010. – 940–950 с.
2. Матаев Т.М. Кластерный подход в развитии модели партнерства государства и предпринимательских структур в транспортной сфере Республики Казахстан // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2014. – №4 (60). – С. 237–239 // <https://cyberleninka.ru/article/n/klasternyy-podhod-v-razvitiy-modeli-partnerstva-gosudarstva-i-predprinimatelskih-struktur-v-transportnoy-sfere-v-respublike-kazahstan/viewer> (дата обращения 15.06. 2020)
3. Бактымбет А.С., Дулатбекова Ж.А., Раимбеков Ж.С., Сыздыкбаева Б.У. Структурно-функциональный подход к формированию транспортно-логистического кластера в Казахстане // Бюллетень науки и практики. – 2019. – №10. // <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturno-funktionalnyy-podhod-k-formirovaniyu-transportno-logisticheskogo-klastera-v-kazahstane> (дата обращения 16.06. 2020)
4. Меньшенина И.Г. Региональные кластеры как форма территориальной организации экономики: Автореф. на соискание учёной степени канд. эконом. наук: 28.05.2009. – Екатеринбург, 2009. – 27 с. // [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_003471096/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003471096/) (дата обращения 19.06. 2020)
5. Портер М. Международная конкуренция. – М.: Альпина Паблишер, 2016. – 235–238.
6. Третьяк В.П. Кластеры предприятий как форма квазиинтеграции // Презентация // [www.znaniye.org/FLG/Tretyak/Prezen21\\_10.ppt](http://www.znaniye.org/FLG/Tretyak/Prezen21_10.ppt) (дата обращения 18.06. 2020)
7. Маршалл А. Принципы экономической науки. – М.: Прогресс, 1993. – 348–359 с.
8. Семенова Н.Н. Кластеризация — новое явление в мировой экономике и политике // <http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/klasterizatsiya-novoe-yavlenie-rol-v-mirovoi-ekonomike-politike> (дата обращения 13.06. 2020)
9. Президент Республики Казахстан. О государственной программе инфраструктурного развития «Нұрлы жол» на 2020-2025 годы: Указ, имеющий силу закона, от 31 декабря 2019 года №1055 // <https://www.baiterek.gov.kz/ru/programma-nurly-zhol> (дата обращения 16.06. 2020)
10. Постановление Правительства Республики Казахстан от 12 декабря 2017 года № 827 // Государственная программа «Цифровой Казахстан» // Официальный информационный ресурс Премьер – Министра РК // <http://government.kz/ru/documents/gosprograms/cifrovoy-kazahstan>
11. Президент Республики Казахстан. О реализации Государственной программы «Цифровой Казахстан» // Токаев К. Бумажный документооборот должен быть запрещен. – Акорда, Нұр-Сұлтан // Forbes Kazakhstan (Форбс Казахстан). – 2020. – 5 марта. // (дата обращения 17.06. 2020)
12. Каныбек Т.Н. Вовлечение Казахстана в проект «экономический пояс шелкового пути» // Известия КазУМОиМЯ имени Аблай хана. – 2016. // <https://articlekz.com/article/19771> (дата обращения 19.06. 2020)

13. Арыстанов Ж.Т. Развитие железнодорожной отрасли в Казахстане. – 2016 // <https://articlekz.com/article/21265> (дата обращения 11.06. 2020)
14. Официальный сайт АО «НК «КТЖ» // [www.railways.kz](http://www.railways.kz) (дата обращения 16.06. 2020)
15. Справочник трекинг-компаний // Список железнодорожных станций города Алматы // [https://www.railwagonlocation.com/ru/railway-stations-list.php?road\\_code=68](https://www.railwagonlocation.com/ru/railway-stations-list.php?road_code=68) (дата обращения 15.06. 2020)
16. Итоговый отчет международной логистической выставки TransLogistica (ТрансЛогистика). – 2019. // <https://translogistica.kz/ru/media-tsentr/otraslevye-novosti/novosti-blog/800-gruozoborot-v-kazakhstan-v-2019-godu-vyros-na-2-2> (дата обращения 17.06. 2020)
17. Официальный сайт «КазАВтоЖол» // <https://qaj.kz/> (дата обращения 19.06. 2020)
18. Информационное табло // Список аэропортов Казахстана // <https://aeroport-tablo.online/79-aeroporty-kazakhstana.html> (дата обращения 18.06. 2020)
19. Мостовой З. Авиарынок Казахстана глазами зарубежных экспертов. – 2019. – 24 мая. // <https://365info.kz/2019/05/aviarynok-kazakhstana-glazami-zarubezhnyh-ekspertov-tolko-tsify> (дата обращения 13.06. 2020)
20. Официальный сайт АО «Международный аэропорт Алматы» // <https://www.alaport.com/> (дата обращения 19.06. 2020)
21. Трубопроводные транспортировки обеспечивают уже половину всех доходов транспортного сектора Казахстана // [Zakon.kz](http://Zakon.kz) (Закон.кз). – 2019. – 14 августа. // <https://www.zakon.kz/4981439-truboprovodnyye-transportirovki.html> (дата обращения 18.06. 2020)
22. Транспорт и логистика получат еще 20 млрд. долл. США // Информационное агентство «LS». – 2019. – 4 октября. // <https://www.lsm.kz/kazakhstan-investiruetsya-v-transport-i-logistiku-20-mlrd-dopolnitel-no> (дата обращения 14.06. 2020)
23. Источник предоставлен Казахстанским институтом развития индустрии
24. Склады в Казахстане: реалии и перспективы // Курсив. – 2019. – 3 декабря. // <https://kursiv.kz/news/rynki/2019-12/sklady-v-kazakhstan-realii-i-perspektivy> (дата обращения 19.06. 2020)
25. Складская логистика на пороге изменений // Forbes Kazakhstan. – 2020. – 6 января. // [https://forbes.kz/stats/3pl\\_drayver\\_razvitiya\\_riteyla/](https://forbes.kz/stats/3pl_drayver_razvitiya_riteyla/) (дата обращения 16.06. 2020)
26. Тышканбаева М. Б. Формирование экономики знаний и роль человеческого капитала // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2016. – № 9. – С. 12–22
27. Меньшенина И.Г. Транспортно-логистический кластер в экономической системе региона // Экономика региона. – 2008. – № 3. – С. 262–265 // <https://cyberleninka.ru/article/n/transportno-logisticheskiy-klaster-v-ekonomicheskoy-sisteme-regiona> (дата обращения 19.06. 2020)

## **TRANSPORT AND LOGISTICS CLUSTER DEVELOPMENT PROSPECTS IN THE CITY OF ALMATY**

**Zhandos K. Kegenbekov**

*Kazakh – German University, Almaty, Kazakhstan*

**Anar K. Kongueva**

*Kazakh – German University, Almaty, Kazakhstan*

**Natalya M. Saprykina**

*Kazakh – German University, Almaty, Kazakhstan*

*Abstract. The article deals with the possibilities of forming a unique transport and logistics cluster (TLC) in Kazakhstan.*

*The goal of the research: to carry out a structural and functional analysis of the infrastructure, identify challenges in logistics, as well as propose measures of transport and logistics processes optimization. The article provides the main tasks, functions and structure of the TLC. The authors justify the importance of continuous logistics systems development in order to increase the share of the Republic of Kazakhstan in transit flows. The scientific novelty is obtaining original results. Forming the TLC is expected to increase Kazakhstan's competitiveness in the worldwide marketplace, optimize commodity flows service, develop logistics information system, reduce transportation time and create new jobs. In case of successful implementation of the cluster approach in Almaty, there will be conditions for effective functioning of industry clusters in other cities of The Republic of Kazakhstan.*

Keywords: *cluster, retail, stakeholder, transit potential, integration, digitalization, venture capital investments, logistics.*

#### References:

1. Porter M. Konkurenciya. – M.: Vil'yams, 2010. – 940–950 s.
2. Mataev T.M. Klasterny'j podxod v razvitii modeli partnerstva gosudarstva i predprinimatel'skix struktur v transportnoj sfere Respubliki Kazaxstan // Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2014. – №4 (60). – S. 237–239. // <https://cyberleninka.ru/article/n/klasternyy-podhod-v-razviti-i-modeli-partnerstva-gosudarstva-i-predprinimatelskih-struktur-v-transportnoy-sfere-v-respublike-kazahstan/viewer> (Web. 15 June 2020)
3. Baky'mbet A.S., Dulatbekova Zh.A., Raimbekov Zh.S., Sy'zdy'kbaeva B.U. Strukturno-funkcional'ny'j podxod k formirovaniyu transportno-logisticheskogo klastera v Kazaxstane // Byulleten' nauki i praktiki. – 2019. – №10. // <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturno-funktsionalnyy-podhod-k-formirovaniyu-transportno-logisticheskogo-klastera-v-kazahstane> (Web. 16 June 2020)
4. Men'shenina I. G. Regional'ny'e klastery' kak forma territorial'noj organizacii e'konomiki: Avtoref. na soiskanie uchyonoy stepeni kand. e'konom. nauk: 28.05.2009. – Ekaterinburg, 2009. – 27s. // [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_003471096/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003471096/) (Web. 19 June 2020)
5. Porter M. Mezhdunarodnaya konkurenciya. – M.: Al'pina Pablisher, 2016. – 235-238 s.
6. Tret'yak V.P. Klastery' predpriyatij kak forma kvaziintegracii // Prezentaciya // [www.znanie.org/FLG/Tret'yak/Prezen21\\_10.ppt](http://www.znanie.org/FLG/Tret'yak/Prezen21_10.ppt) (Web. 18 June 2020)
7. Marshall A. Principy' e'konomicheskoy nauki. – M.: Progress, 1993. – 348-359 s.
8. Semenova N.N. Klasterizaciya – novoe yavlenie v mirovoj e'konomike i politike // <http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/klasterizatsiya-novoe-yavlenie-rol-v-mirovoi-ekonomike-politike> (Web. 13 June 2020)
9. Prezident Respubliki Kazaxstan. O gosudarstvennoj programme infrastruktornogo razvitiya «Nyrly' zhol» na 2020-2025 gody': Ukaz, imeyushhij silu zakona, ot 31 dekabrya 2019 goda №1055 // <https://www.baiterek.gov.kz/ru/programma-nurly-zhol> (Web. 16 June 2020)
10. Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazaxstan ot 12 dekabrya 2017 goda № 827 // Gosudarstvennaya programma «Cifrovoy Kazaxstan» // Oficial'ny'j informacionny'j resurs Prem'er – Ministra RK // <http://government.kz/ru/documents/gosprograms/cifrovoi-kazahstan>
11. Prezident Respubliki Kazaxstan. O realizacii Gosudarstvennoj programmy' «Cifrovoy Kazaxstan» // Tokaev K. Bumazhny'j dokumentooborot dolzhen byt' zapreshhen. – Akorda, Nur-Sultan // Forbes Kazakhstan (Forbs Kazaxstan). – 2020. – 5 marta. // [https://forbes.kz/process/tokaev\\_bumajnyiy-dokumentoborot\\_doljen\\_byit\\_zapreschen](https://forbes.kz/process/tokaev_bumajnyiy-dokumentoborot_doljen_byit_zapreschen) (Web. 17 June 2020)
12. Kany'bek T. N Vovlechenie Kazaxstana v projekt «e'konomicheskij poyas shelkovogo puti» // Izvestiya KazUMOiMYa imeni Ablaj xana. – 2016. // <https://articlekz.com/article/19771> (Web. 19 June 2020)
13. Ary'stanov Zh. T. Razvitie zheleznodorozhnoj otrasli v Kazaxstane. – 2016 // <https://articlekz.com/article/21265> (Web. 11 June 2020)
14. Oficial'ny'j sayt AO «NK «KTZh» // [www.railways.kz](http://www.railways.kz) (Web. 16 June 2020)
15. Spravochnik trekning – kompanii // Spisok zheleznodorozhny'x stancij goroda Almaty' // [https://www.railwagonlocation.com/ru/railway-stations-list.php?road\\_code=68](https://www.railwagonlocation.com/ru/railway-stations-list.php?road_code=68) (Web. 15 June 2020)
16. Itogovy'j otchyot mezhdunarodnoj logisticheskoy vy'stavki TransLogistica (TransLogistika). – 2019 // <https://translogistica.kz/ru/media-tsentr/otraslevye-novosti/novosti-blog/800-gruzooborot-v-kazahstane-v-2019-godu-vyros-na-2-2> (Web. 17 June 2020)
17. Oficial'ny'j sayt «KazAVtoZhol» // <https://qaj.kz/> (Web. 14 June 2020)
18. Informacionnoe tablo // Spisok ae'roportov Kazaxstana // <https://aeroport-tablo.online/79-aeroporty-kazahstana.html> (Web. 18 June 2020)
19. Mostovoj Z. Aviary'ny' nok Kazaxstana glazami zarubezhny'x e'kspertov. – 2019. – 24 maya. // <https://365info.kz/2019/05/aviarynok-kazahstana-glazami-zarubezhnyh-ekspertov-tolko-tsifry> (Web. 13 June 2020)
20. Oficial'ny'j sayt AO «Mezhdunarodny'j ae'roport Almaty'» // <https://www.alaport.com/> (Web. 19 June 2020)
21. Truboprovodny'e transportirovki obespechivayut uzhe polovinu vsex doxodov transportnogo sektora Kazaxstana // Zakon.kz (Zakon.kz). – 2019. – 14 avgusta. // <https://www.zakon.kz/4981439-truboprovodnye-transportirovki.html> (Web. 18 June 2020)

22. Transport i logistika poluchat eshhe 20 mlrd. doll. SShA // Informacionnoe agenstvo «LS». – 2019. – 4 oktyabrya. // <https://www.lsm.kz/kazahstan-investiruet-v-transport-i-logistiku-20-mlrd-dopolnitel-no> (Web. 14 June 2020)
23. Istochnik predostavljen Kazaxstanskim institutom razvitiya industrii
24. Sklady` v Kazaxstane: realii i perspektivy` // Kursiv. – 2019. – 3 dekabrya // <https://kursiv.kz/news/rynki/2019-12/sklady-v-kazahstane-realii-i-perspektivy> (Web. 19 June 2020)
25. Skladskaya logistika na poroge izmenenij // Forbes Kazakhstan. – 2020. – 6 yanvaryya. // [https://forbes.kz/stats/3pl\\_dravyer\\_razvitiya\\_riteyla/](https://forbes.kz/stats/3pl_dravyer_razvitiya_riteyla/) (Web. 16 June 2020)
26. Ty`shkanbaeva M. B. Formirovanie e`konomiki znaniy i rol` chelovecheskogo kapitala // E`konomika: vchera, segodnya, zavtra. – 2016. – № 9. – S. 12-22
27. Men`shenina I.G Transportno-logisticheskij klaster v e`konomicheskoy sisteme regiona // E`konomika regiona. – 2008. – № 3. – S. 262–265. // <https://cyberleninka.ru/article/n/transportno-logisticheskij-klaster-v-ekonomicheskoy-sisteme-regiona> (Web. 19 June 2020 )

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Кегенбеков Жандос Кадырханович**, к.т.н., доцент, декан факультета инжиниринга и информационных технологий, Казахстанско - Немецкий Университет, 050010, г. Алматы, ул. Пушкина, 111, e-mail: kegenbekov@dku.kz

**Zhandos K. Kegenbekov**, Ph.D. in Engineering Science, Dean of the faculty of engineering and information technology, Kazakh – German University, 111, Pushkin st, Almaty, 050010

**Конгуева Анар Женисовна**, магистр делового администрирования, преподаватель факультета инжиниринга и информационных технологий, Казахстанско -Немецкий Университет, 050010, г. Алматы, ул. Пушкина 111, e-mail: anar.konguyeva@petroleum.com.kz

**Anar Zh. Kongueva**, master of business administration, lecturer of the faculty of engineering and information technology, Kazakh – German University, 111, Pushkin st, Almaty, 050010

**Сапрыкина Наталья Михайловна**, студентка Казахстанско-Немецкого Университета (специальность Логистика), 050010, г. Алматы, ул. Пушкина, 111, e-mail: saprykinatasha@mail.ru

**Natalya M. Saprykina** Bachelor student of Kazakh – German University(Logistics speciality), 111, Pushkin st, Almaty, 050010

Статья поступила в редакцию 22.06.2020 г.

УДК 656.621.2

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.106>

## КОНЦЕПЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ РАЗМЕРОВ ДОТИРОВАНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ВНУТРЕННИМ ВОДНЫМ ТРАНСПОРТОМ

**В.И. Минеев**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-7922>*

**В.М. Иванов**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0195-934X>*

**Г.В. Веселов**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7507-7649>*

**М.В. Иванов**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9119-9232>*

*Аннотация: Практика перевозки пассажиров, как в России, так и за рубежом свидетельствует, что данные перевозки малорентабельны или убыточны за исключением туристических перевозок. Учитывая социальную значимость пассажирских перевозок для населения огромной территории Российской Федерации, органы государственной власти реализуют меры государственной поддержки различных видов транспорта для осуществления этих перевозок, включая возмещение расходов транспортным предприятиям из бюджетов различных уровней. Очевидно, что вопрос о том, какие виды транспорта дотировать и в каких объемах, требует отдельного внимания. Вместе с тем, субсидирование пассажирских перевозок внутренним водным транспортом отменено с 2005 года, а принимаемые в субъектах Российской Федерации решения по дотированию из региональных и муниципальных бюджетов довольно часто не компенсируют расходы судоходных компаний. В статье предлагаются возможные варианты, по сути, возрождения социально значимых пассажирских перевозок внутренним водным транспортом в России и предложен подход к определению предельного размера дотаций на погашение убыточности социально значимых пассажирских перевозок. Авторами статьи показано, за счет каких факторов могут быть получены прямая и косвенная (вне-транспортная) составляющие эффекта в результате внедрения их предложений в практику работы предприятий водного пассажирского транспорта.*

*Ключевые слова: внутренний водный транспорт, пассажирские перевозки, убытки, дотации, поддержка государства, государственно-частое партнерство.*

### Введение

Состояние транспортной инфраструктуры в значительной степени определяет уровень социально-экономического благосостояния общества. Ее основной задачей является обеспечение непосредственной поддержки производственной деятельности и облегчение перемещения товаров и людей. Как показывает практика, для достижения приемлемого уровня благосостояния общества возникает необходимость государственного вмешательства в функционирование транспортной инфраструктуры. В ос-

новном, речь идет о различных формах поддержки организаций, выполняющих социально значимую транспортную работу. При принятии решений по обеспечению функционирования транспортной инфраструктуры на всех уровнях государственного и муниципального управления в первую очередь рассматривается такой вид деятельности, как пассажирские перевозки.

### Основная часть

В 2018 году всеми видами транспорта общего пользования Российской Федерации было перевезено 17,9 млн. пассажиров, что составило 81,7% к уровню 2011 года), при этом пассажирооборот составил 586,0 млрд. пасс.-км (116,5% к уровню 2011 года). Динамика объемов пассажирских перевозок приведена в табл.1, а пассажирооборота – в табл. 2. Рост пассажирооборота по отношению к 2011 году отмечался на воздушном (172%) и морском (114%) транспорте (табл. 2).

Таблица 1

**Динамика пассажирских перевозок в Российской Федерации за период с 2011 по 2018 годы**

Вид пассажирских перевозок	Количество перевезенных пассажиров, млн. чел.						
	2011 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
железнодорожные	993,1	1079,6	1076,4	1024,6	1040,0	1121,3	1050,1
автомобильные	13332	11618	11576	11550	11341	10939	10573
морские	1,3	0,5	6,9	10,8	13,0	11,7	7,5
речные и озерные	14,2	13,0	12,6	14,0	13,5	12,7	12,3
воздушные	66,0	86,0	95,0	94,0	91,0	105,1	116,2

Таблица 2

**Пассажирооборот транспорта общего пользования Российской Федерации за период с 2011 по 2018 годы**

Вид пассажирских перевозок	Пассажирооборот, млрд. пасс.-км						
	2011 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
железнодорожные	139,8	138,5	130,0	120,6	124,6	122,9	129,5
автомобильные	138,6	126,0	127,1	126,3	124,3	116,2	114,1
морские	0,05	0,04	0,07	0,06	0,09	0,08	0,057
речные и озерные	0,68	0,60	0,52	0,49	0,60	0,56	0,571
воздушные	166,8	225,2	241,4	226,9	215,6	258,8	286,9

Структура перевозок пассажиров по видам транспорта приведена на рис. 1, а пассажирооборота – на рис. 2.

В структуре объема перевозок по-прежнему доминирующую роль играет автобусный транспорт (59,1%) (табл. 1). В связи со значительным ростом паромного сообщения с Крымским федеральным округом на порядок возросла доля перевозок морским транспортом. Однако пуск в эксплуатацию железнодорожного моста будет способствовать снижению объема перевозок пассажиров морским транспортом. Более чем в два раза возросла доля воздушного транспорта. Увеличились доли железнодорожного (на 31,1%) и внутреннего водного транспорта (на 16,6%) за счет сокращения доли перевозок пассажиров автомобильным и городским наземным электротранспортом (рис. 1).

Доля воздушного транспорта в структуре пассажирооборота в 2018 году относительно 2011 года резко возросла (до 49%). При этом роль железнодорожного и автомобильного транспорта уменьшилась, что выразилось в их доли на рынке пассажир-

ских перевозок соответственно в 22,1% и 19,5%. Незначительная доля морского и внутреннего водного транспорта практически остались на уровне 2011 года (рис. 2).

Перевозки пассажиров как в России, так и за рубежом, малорентабельны или убыточны за исключением туристических перевозок [1–3].

Учитывая социальную значимость пассажирских перевозок для населения огромной территории Российской Федерации, государство дотирует различные виды транспорта для осуществления этих перевозок [4–6].

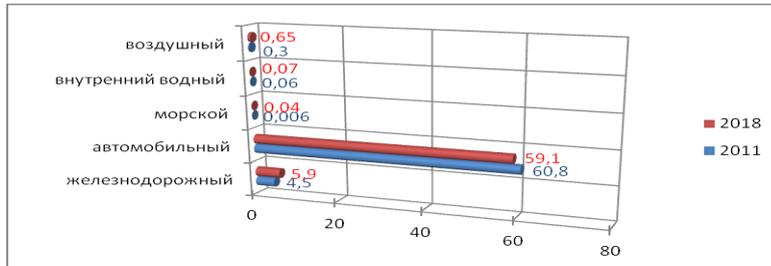


Рис. 1. Распределение перевозок по видам транспорта в части числа перевезенных пассажиров, %

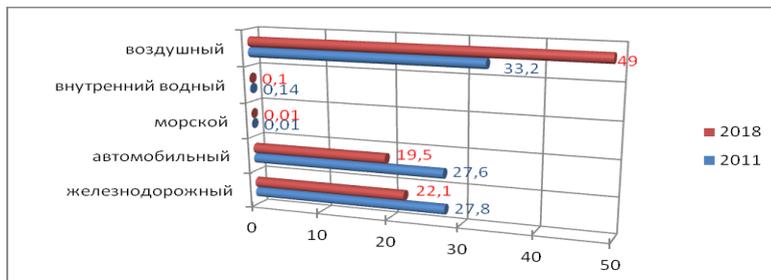


Рис. 2. Распределение перевозок по видам транспорта в части объема транспортной работы в пассажирокилометрах, %

Так, в 2016 году для обеспечения пригородного и дальнего сообщения с использованием железнодорожного транспорта был принят Федеральный закон от 30.11.2016 № 401-ФЗ. Он, в частности, предусматривал льготный период налогообложения предприятий железнодорожного транспорта при предоставлении услуг по перевозке пассажиров в пригородном сообщении по нулевой ставке НДС до 2030 года. Аналогичное решение было принято и по перевозкам пассажиров в дальнем следовании с 01.01.2017 до 01.01.2030.

Для развития автомобильного транспорта на государственном уровне предусмотрена реализация проекта «Безопасные и качественные дороги». Данный проект общей стоимостью 640 трлн. рублей направлен на крупномасштабный ремонт и строительство автомобильных дорог в 34 городских агломерациях, в каждой из которых проживает 500 тыс. человек и более.

Большое внимание на государственном уровне уделяется развитию воздушного транспорта. В авиационном секторе транспортных услуг только 2016 году было реализовано пять программ субсидирования из федерального бюджета. В общей сложности бюджетные ассигнования составили 8,0 млрд. рублей. В 2017 году стимулирующие развитие авиационных перевозок мероприятия были продолжены, когда Правительством страны был расширен перечень субсидируемых воздушных перевозок. Не удивительно, что с тех пор авиационный транспорт демонстрирует высокие темпы роста перевозок.

Если к этому добавить разного рода региональные программы поддержки воз-

душного сообщения, то становится очевидным, что именно благодаря финансовой поддержке из бюджетов различных уровней воздушный транспорт получил высокий рейтинг в рамках транспортного рынка страны. Действующие льготы по ставке НДС на услуги по перевозке пассажиров воздушным транспортом на внутренних воздушных линиях позволили существенно повысить доступность внутренних авиаперевозок для населения. В связи с этим, немного странно выглядит факт того, что по предварительным данным Содружества авиационных экспертов (Aviation Explorer) воздушный транспорт России закончил 2018 год с убытком 37–39 млрд. руб.

Что же касается субсидирования пассажирских перевозок внутренним водным транспортом, то оно отменено с 2005 года. К сожалению, в ряде регионов, где по отдельным направлениям движения для организации пассажирских перевозок привлекается водный транспорт, выделяемые субъектами Российской Федерации средства чаще всего не компенсируют расходы судоходных компаний. В результате работа водных пассажирских линий организуется с недостаточной для населения частотой отправок, что в определенной степени снижает имидж водного транспорта.

В советское время перевозки пассажиров по внутренним водным путям в прибрежных регионах были хорошо развиты. С перестройкой экономических отношений малорентабельные пассажирские перевозки прекратили свое существование в результате снижения эффективности судоходных компаний на рынке пассажирских перевозок. Как результат – падение объема перевозок пассажиров на внутреннем водном транспорте в 2018 году в 10 раз по отношению к 1980 году, снижение пассажирооборота в среднем по России в 10,7 раз, в т.ч. в северном регионе – в 23,4 раза, в центральном – в 10,8 раз, сибирском – в 8,2 раз [7,8].

Наиболее существенное падение объемов перевозок произошло в 90-х годах XX века из-за резкого увеличения судовых эксплуатационных расходов, прежде всего, связанного со значительным повышением стоимости топлива на фоне снижения платежеспособного спроса населения.

Учитывая безальтернативность в ряде регионов перевозок внутренним водным транспортом, до 2004 г. межобластные речные пассажирские перевозки субсидировались из федерального бюджета. Была разработана специальная методика расчета размера субсидии, форма государственного контракта, форма отчета по использованию средств.

После отнесения вопросов транспортного обслуживания населения к полномочиям субъектов Российской Федерации и, соответственно, прекращения субсидирования из федерального бюджета, межобластные или, как их в соответствии с «Правилами перевозки пассажиров и их багажа на внутреннем водном транспорте» называют, транзитные речные пассажирские перевозки по транспортным маршрутам, практически прекратились. В настоящее время транспортные перевозки пассажиров, в основном, осуществляются на местных, пригородных и внутригородских маршрутах и в тех регионах, где они по-прежнему безальтернативны.

Сейчас наша страна пришла к тому, что в общем объеме числа перевезенных пассажиров внутренние водные пассажирские перевозки не превышают 1%. Практически прекратились перевозки в Воронежской, Ивановской, Липецкой, Рязанской, Вологодской, Кемеровской областях, Республике Карелия [7].

Безусловно, есть объективные и субъективные причины такого положения дел. К объективным причинам можно отнести сезонность работы водного транспорта, старение флота, интенсивное строительство автомобильных дорог параллельно водным путям и мостов, высокая стоимость топлива. Все это привело к оттоку пассажиров на другие виды транспорта и, в первую очередь, на автомобильный транспорт.

На современном этапе востребованность внутренних водных путей сохранилась для организации паромных переправ на социально значимых маршрутах, а также для доставки населения в населенные пункты, непосредственно находящиеся у берега и не имеющих альтернативных путей сообщения.

Ярким показателем безальтернативности внутренних водных путей в северных и сибирских регионах является превышение протяженности водных путей над железнодорожными путями, которое составляет в Республике Саха (Якутия) – 31,8 раз; Томской области – 14,9 раза; Ямало-Ненецком автономном округе – 8,5 раза; Ханты-Мансийском автономном округе – 5,7 раза. При этом протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием, по указанным субъектам сопоставима или ниже протяженности водных путей: так отношение протяженности автомобильных дорог к протяженности водных путей составляет в Томской области 1,4 раза, Ханты-Мансийском автономном округе – 0,9 раза; Республике Саха (Якутия) – 0,7 раза; Ямало-Ненецком автономном округе – 0,5 раза [7,9].

Не во всех субъектах страны органы государственной и муниципальной власти в должной мере выполняют свою социальную функцию в части транспортного обеспечения населения. В то же время, именно за счет роста речных пассажирских перевозок в регионах, имеющих высокую плотность водных путей, можно с минимальными расходами обеспечить повышение региональной транспортной доступности.

В этой связи хотелось бы напомнить о неоспоримых преимуществах пассажирских перевозок внутренним водным транспортом на местных и пригородных линиях по сравнению с автомобильным транспортом как альтернативным видом сообщения.

Во-первых, наличие естественных водных путей, которые могут использоваться для перевозок пассажиров не только в летний период, но и зимой. В зимний период скорость судов на воздушной подушке даже возрастает за счет «жесткого экрана».

Во-вторых, в настоящее время объемы финансирования затрат, обусловленных необходимостью содержания автомобильных дорог общего пользования федерального и регионального значения, настолько велики, что с ними не могут справиться бюджеты большинства субъектов Российской Федерации. При этом не принимается во внимание, что в расчете на 10 ткм грузооборота государственные расходы на содержание автомобильного транспорта в 2016 году были в 14,3 раза выше по сравнению с расходами на внутренний водный транспорт (рис. 3) [10].

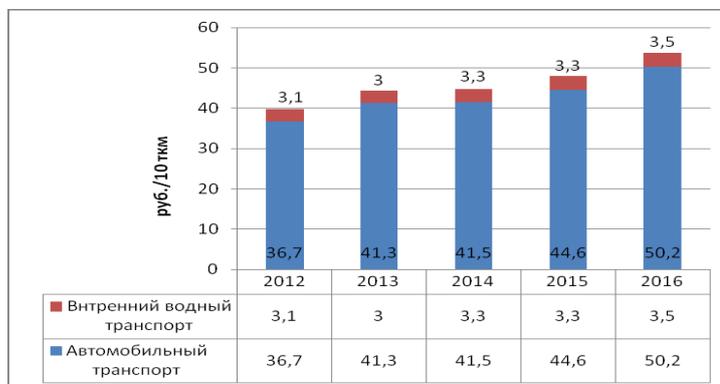


Рис. 3. Объемы финансирования инфраструктуры, рублей на 10 ткм

В-третьих, только водный транспорт может обеспечить сообщение жителей приречных населенных пунктов, расположенных на берегах не только магистральных, но и боковых рек при отсутствии автодорог и мостовых переходов. В качестве примера можно указать на проблему транспортного обеспечения водным пассажирским транспортом более 20 тысяч жителей города Архангельска и Приморского муниципального района. Они проживают на островах дельты р. Северная Двина, и им необходимы регулярные речные внутригородские и пригородные перевозки [11].

В-четвертых, в большинстве своем практически не используемая высокая пропускная способность внутренних водных путей. В настоящее время не имеют связи с сетью автомобильных дорог по дорогам с твердым покрытием 43,9 тыс. населенных

пунктов, или 29,4% общего числа населенных пунктов страны. Население каждого из 260 194 таких населенных пунктов составляет более 1000 человек. Более 30% протяженности автомобильных дорог общего пользования местного значения не отвечает нормативным требованиям. Не завершено формирование опорной сети дорог в районах Севера, Сибири и Дальнего Востока [12]. А в это время водное сообщение регионов не используется при наличии водных путей, оборудованных судоходной обстановкой, или же водные пути просто находятся в состоянии запустения.

В-пятых, это проблема выбросов CO<sub>2</sub>, без которых, к сожалению, не может работать самый распространенный вид пассажирского транспорта в стране – автомобильный. На долю автомобильного транспорта приходится 75% транспортных выбросов CO<sub>2</sub>, в то время как совокупная доля железнодорожного и водного транспорта составляет 12,5%, а авиации – 12,5% [18].

И последнее, согласно статистическим данным на водном транспорте существенно выше безопасность движения по сравнению с автомобильным транспортом. Уровень аварийности на внутренних водных путях (в денежной оценке) ниже, чем на автотранспорте, в 14 раз [10].

Изложенное выше свидетельствует об отсутствии концепции научного обоснования размеров дотаций различных видов пассажирского транспорта на основе определения не только коммерческого, но и народнохозяйственного эффекта.

Какие же возможные варианты, по сути, возрождения социально значимых пассажирских перевозок внутренним водным транспортом в России?

12 сентября 2019 года в Нижнем Новгороде по инициативе Председателя Законодательного Собрания Нижегородской области Е.В. Лебедева прошло заседание Ассоциации законодательных (представительных) органов государственной власти субъектов Российской Федерации Приволжского федерального округа, посвященное состоянию и перспективам развития перевозок внутренним водным транспортом в субъектах Российской Федерации. Ассоциация в своем решении определила систему мер государственной поддержки нормативно-правового, финансового, налогового и административного характера, включая разработку долгосрочной целевой государственной программы обновления грузового и пассажирского флота, развития объектов инфраструктуры, в том числе инженерных объектов, обеспечивающих беспрепятственное транзитное судоходство.

На наш взгляд, первоочередными мерами, направленными на возрождение водных пассажирских перевозок, могут являться следующие:

1. Возобновление субсидирования из Федерального бюджета в первую очередь в целях возмещения части затрат на приобретение судового топлива.

2. Создание в регионах судоходных компаний на принципах частно-государственного партнерства с преобладающим капиталом администрации региона для работы на социально значимых пассажирских маршрутах. Необходимо наделить эти судоходные компании такими же льготами, какими наделяются судоходные компании, регистрирующие суда в Российском международном реестре судов согласно федеральному закону №305-ФЗ (2011 г.).

3. Распространение на судоходные компании, осуществляющие в том числе пассажирские перевозки, действия постановления Правительства РФ от 22 мая 2008 года № 383 «Об утверждении Правил предоставления субсидий российским организациям на возмещение части затрат на уплату процентов по кредитам, полученным в российских кредитных организациях и в государственной корпорации развития «ВЭБ.РФ» в 2009–2021 годах, а также на уплату лизинговых платежей по договорам лизинга, заключенным в 2009–2021 годах с российскими лизинговыми компаниями на приобретение гражданских судов» при закупке (строительстве) пассажирских судов для социально значимых пассажирских перевозок.

При оценке эффективности и определении объема субсидирования социально значимых пассажирских перевозок необходимо учитывать то обстоятельство, что раз-

витие внутреннего водного транспорта приносит эффект как непосредственно транспортной отрасли, так и за ее пределами [13–17].

Таким образом, предельный размер дотаций на погашение убыточности социально значимых пассажирских перевозок предлагается определять по следующему выражению:

$$D_{\text{пск}}^{\text{max}} \leq \pm \Pi_{\text{пск}}^{\text{ч}} + B_{\text{эф}} + B_{\text{эф}}^{\text{н/х}} + Y_{\text{эк}} + \Theta_{\text{тд}} \quad (1)$$

где:  $\pm \Pi_{\text{пск}}^{\text{ч}}$  – чистая прибыль (убытки) от социально значимых перевозок пассажирской судоходной компании (коммерческий эффект), руб.;

$B_{\text{эф}}$  – бюджетная эффективность от деятельности пассажирской судоходной компании, руб.;

$B_{\text{эф}}^{\text{н/х}}$  – величина поступления налогов в бюджет от деятельности предприятий в сопутствующих и сопряженных отраслях с внутренним водным транспортом, руб.;

$Y_{\text{эк}}$  – величина экологического эффекта снижения вредных выбросов в атмосферу от эксплуатации внутреннего водного транспорта, руб.;

$\Theta_{\text{тд}}$  – величина косвенного эффекта от повышения транспортной доступности и подвижности населения, руб.

Расчет коммерческого эффекта осуществляется на основе:

1. Характеристики возможных линий эксплуатации пассажирского флота (*протяженность линий, количество остановочных пунктов, условия плавания и т.д.*)
2. Техничко-эксплуатационной характеристики пассажирского судна (*тип судна, главные размерения, скорость движения судна, мощность силовой установки и т.д.*)
3. Определения прямых и накладных расходов по судну.

Бюджетная эффективность развития водного транспорта определяется на основании потока бюджетных средств от налоговых поступлений предприятий, работающих на рынке транспортных услуг (судоходных компаний): НДС, налог на имущество, налог на прибыль, подоходный налог с работников, отчисления на социальные нужды.

При определении внутранспортного эффекта необходимо учитывать, что развитие социально значимых пассажирских перевозок в регионах России будет способствовать повышению эффективности деятельности таких отраслей как металлургическая, судостроительная, добывающая, перерабатывающая и другие.

Косвенный эффект от повышения транспортной доступности и подвижности населения определяется с учетом изменения рыночной стоимости имущества граждан (жилья, земельных участков и др.). Последнее в значительной степени обусловлено развитием пассажирских перевозок в регионе, экономии времени населения на транспортные коммуникации и рост уровня занятости в регионе.

Предварительные расчеты по определению мультипликативного эффекта от привлечения на внутренний водный транспорт 1 млн. пассажиров показывают, что объем рынка транспортных услуг составит 5–6 млрд. руб. в год.

### Заключение

Отечественный и зарубежный опыт развития пассажирских перевозок показывает, что именно этот сектор инфраструктуры национальных экономик большинства стран мира невозможен без существенной государственной поддержки. В этом смысле водные пассажирские перевозки в значительной части регионов Российской Федерации не входят в перечень социально значимых и, как результат, не имеют должной государственной (муниципальной) поддержки. В определенной степени это связано с незначительной долей числа перевозимых водным транспортом пассажиров в общем объеме пассажирских перевозок в региональном и межрегиональном сообщениях. Однако, как показывает в первую очередь зарубежный опыт, чрезмерное акцентирование на развитии одного вида пассажирского транспорта, а в России это автомо-

бильное сообщение, в итоге ведет к непропорциональному развитию транспортной инфраструктуры, а в части автомобильного транспорта – еще и существенному ухудшению экологической ситуации.

Водный пассажирский транспорт, являясь относительно экологически чистым видом транспортного сообщения, в современных условиях не может составить реальную конкуренцию другим видам транспорта, в первую очередь, автомобильному. В основном, это связано с высокой строительной стоимостью пассажирского флота и ростом цен на топливо. В связи этим, авторы статьи предлагают механизм экономической поддержки предприятий водного транспорта, осуществляющих социально значимые пассажирские перевозки. В случае реализации сформулированных выше предложений у водного транспорта появится шанс не только на развитие, но и на включение в систему модальных пассажирских перевозок, что приведет к повышению транспортной обеспеченности населения страны.

#### **Список литературы:**

1. Минеев В.И. Определение размеров государственных дотаций и субсидий скоростных пассажирских перевозок на водном транспорте /В.И. Минеев, Е.А. Хохлов//Вестник ВГАВТ. – 2005. – Вып. 14. – С. 137–142.
2. Минеев, В.И. Недоступный транспорт: обсуждение проблемы доступности транспорта. /В.И. Минеев//Речной транспорт (XXI век). – 2010. – № 6. – С. 68–71.
3. Börjesson, M. Distributional effects of public transport subsidies / M. Börjesson, J. Eliasson, I. Rubensson //Journal of Transport Geography, Volume 84, April 2020.- Article 102674.
4. Жмачинский В.И., Иванов М.В. Организация речных городских пассажирских перевозок как фактор повышения транспортной доступности населения / В.И. Жмачинский, М.В. Иванов// Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2014. – №11 (71). –С.54
5. Socorro, M.P. Air transport subsidies for resident passengers: The unexpected effects on competition / M. P. Socorro, O. Betancor //Research in Transportation Economics In press, corrected proof Available online 25 November 2019/- Article 100772.
6. Valido, J. Air transport subsidies for resident passengers when carriers have market power/ J. Valido, M.P. Socorro, A. Hernández, O. Betancor //Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 70. October 2014. – p. 388–399.
7. Материалы заседания президиума Госсовета по вопросу развития внутренних водных путей. 15.09.2016 года, г. Волгоград. [Электронный ресурс]: <http://special.kremlin.ru/events/state-council/52713>.
8. Легостаева Н.В., Введенский И.А. Современные тенденции и проблемы развития пассажирских перевозок внутренним водным транспортом России /Н.В. Легостаева, И.А. Введенский//Транспортное дело России. – 2019. – №6. – С. 129–131
9. Борисова М.А., Жук Л.С., Корешкова О.А. Пассажирский водный транспорт в РФ. Реалии и перспективы/ М.А. Борисова, Л.С. Жук, О.А. Корешкова// Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017.- № 5-1. – С7 87–91.
10. Фролова О.Н. Макроэкономический подход к обоснованию транспортных проектов/О.Н. Фролова// Мир транспорта. – 2017 -. № 5, С. 118–129
11. Ненашева М.В., Олсен Ю.О. Водный транспорт европейского севера России: социальная значимость, проблемы и перспективы развития/М.В. Ненашева, Ю.О. Олсен //Арктика и Север. – 2018. – № 32. – С. 49–62.
12. Развитие транспортной системы России (2010–2030 годы). [Электронный ресурс]: [Федеральная целевая программа: утверждена распоряжением правительства РФ от 05.12.2001 г. №848; в ред. от 27.02.2017 г.]. [Электронный ресурс]: <http://www.consultant.ru>.
13. Краев, В.И. Экономическая оценка инвестиций на водном транспорте / В.И. Краев, Т.А. Пангина; под ред. В.И.Краева. – СПб.: СПбГПУ, 2003. – С. 299
14. Moreno-Monroy A.I. The effect of commuting costs and transport subsidies on informality rates /A.I. Moreno-Monroy, H.M. Posada //Journal of Development Economics Volume 130, January 2018/ – p. 99–112.
15. Tscharaktschiew, S. Should subsidies to urban passenger transport be increased? A spatial CGE analysis for a German metropolitan area / S. Tscharaktschiew, G. Hirte //Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 46, Issue 2. February 2012/- p. 285–309.
16. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утв.

Минэкономки РФ, Минфин РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 N BK 477). [Электронный ресурс]: <http://www.consultant.ru>.

17. Rus, G. Pricing and investment in alternative transport infrastructures/ G.de Rus, M. P. Socorro //Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Volume 119, January 2019.- p.96-107.

18. Stern, N. The Economics of Climate Change: the Stern review /Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. [Электронный ресурс]: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511817434>.

## THE CONCEPT OF ECONOMIC SUBSTANTIATION OF PASSENGER TRANSPORTATION SUBSIDIZING BY INLAND WATER TRANSPORT

**Valery I. Mineev**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Valery M. Ivanov**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Gennady V. Veselov**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Mikhail V. Ivanov**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract: The passenger transportation practice, both in Russia and abroad, shows that this transportation give little profit or completely unprofitable with the exception of tourist transportation. Given the social significance of passenger transportation for the population of the vast territory of the Russian Federation, state authorities implement measures of the state support for various types of transport for these transportations, including reimbursement of expenses to transport enterprises from budgets of various levels. Obviously, the question which type of transport to subsidize and how much requires special attention. At the same time, passenger transportation subsidizing by inland waterways has been canceled since 2005, and decisions made in the constituent entities of the Russian Federation on subsidizing from regional and municipal budgets quite often do not compensate the expenses of shipping companies. The article proposes possible options, in fact, for the revival of socially significant passenger transportation by inland water transport in Russia and proposes an approach to determining the maximum amount of subsidies to cover the loss of socially significant passenger transportation. The authors of the article have shown due to what factors direct and indirect (non-transport) components of the effect can be obtained as a result of the implementation of their proposals in the practice of water passenger transport enterprises.*

*Keywords: inland water transport, passenger transportation, losses, subsidies, state support, public-private partnership.*

### References:

1. Mineev V.I. Determining the size of state subsidies and subsidies for high-speed passenger transport on water transport /V.I. Mineev, E.A. Khokhlov // Vestnik VGAVT. – 2005. – Vol. 14. – Pp. 137-142.
2. Mineev V.I. Inaccessible transport: discussion of the problem of transport accessibility / V.I. Mineev // River transport (XXI century). – 2010. – No. 6. – Pp. 68-71
3. Börjesson, M. Distributive effects of public transport subsidies / M. Börjesson, J. Eliasson, I. Rubensson // Journal of Transport Geography, Volume 84, April 2020.- Article 102674.
4. Zhmachinsky V.I., Ivanov M.V. Organization of river urban passenger transportations as a factor of increasing transport accessibility of the population // Management of economic systems: electronic scientific journal. – 2014. – No. 11 (71). – P. 54
5. Socorro, M.R. Air transport subsidies for resident passengers: The unexpected effects on competition / M.P. Socorro, O. Betancor // Research in Transportation Economics In press, corrected proof Available online 25 November 2019/ – Article 100772.
6. Valido, J. Air transport subsidies for resident passengers when carriers have market power/ J. Valido, M.P. Socorro, A. Hernández, O. Betancor //Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 70. October 2014.- p. 388-399.

7. Materials of the meeting of the state Council Presidium on the development of inland waterways. 15.09.2016 years, Volgograd. [Electronic resource]: <http://special.kremlin.ru/events/state-council/52713>.
8. Legostaeva N.V., Vvedenskiy I.A. Modern trends and problems of development of passenger transportations by inland water transport of Russia // Transport business of Russia. – 2019. – №6. – Pp. 129-131
9. Borisova M.A., Zhuk L.S., Koreshkova O.A. Passenger water transport in the Russian Federation. Realities and prospects // Actual problems of Humanities and natural Sciences. – 2017.- №5-1. -С. 87-91.
10. Frolova O.N. Macroeconomic approach to the justification of transport projects. World of transport. – 2017 -. No. 5, Pp. 118-129.
11. Nenasheva M.V., Olsen Yu.O. Water transport of the European North of Russia: social significance, problems and prospects of development // Arctic and North. – 2018. – #32. – Pp. 49-62.
12. Development of the Russian transport system (2010-2030). [Electronic resource]: [Federal target program: approved by the decree of the government of the Russian Federation dated 05.12.2001, No. 848; ed. from 27.02.2017]. [Electronic resource]: <http://www.consultant.ru>.
13. Kraev, V.I. Economic assessment of investments in water transport / V. I. Kraev, T. A. Pantina; ed. – Spb. : SPbGPU, 2003. – P. 299
14. Moreno-Monroy A.I. The effect of commuting costs and transport subsidies on informality rates /A.I. Moreno-Monroy, H.M. Posada //Journal of Development Economics Volume 130, January 2018/ – p. 99-112.
15. Tscharaktschiew, S. Should subsidies to urban passenger transport be increased? A spatial CGE analysis for a German metropolitan area / S. Tscharaktschiew, G. Hirte //Transportation Re-search Part A: Policy and Practice, Volume 46, Issue 2. February 2012/- p. 285-309.
16. Guidelines for evaluating the effectiveness of investment projects (approved Ministry of economy of the Russian Federation, Ministry of Finance of the Russian Federation, Gosstroy of the Russian Federation 21.06.1999 N VK 477). [Electronic resource]: <http://www.consultant.ru>.
17. Rus, G. Pricing and investment in alternative transport infrastructures/ G.de Rus, M. P. So-corro //Transportation Research, Part A: Policy and Practice, Volume 119, January 2019.- p. 96-107.
18. Stern, N. The Economics of Climate Change: the Stern review /Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. [Electronic resource]: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511817434>.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Минеев Валерий Иванович**, д.э.н., профессор, советник при ректорате, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [mineev.vi@vsuwt.ru](mailto:mineev.vi@vsuwt.ru)

**Иванов Валерий Михайлович**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [i52nn@mail.ru](mailto:i52nn@mail.ru)

**Веселов Геннадий Васильевич**, д.э.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [veselovgv37@mail.ru](mailto:veselovgv37@mail.ru)

**Иванов Михаил Валерьевич**, к.э.н., доцент, доцент кафедры экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [ivanov@vsawt.com](mailto:ivanov@vsawt.com)

**Valery I. Mineev**, Doctor of Economics, Professor, Counselor at the university administration, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

**Valery M. Ivanov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Economics and management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

**Gennady V. Veselov**, Doctor of Economics, Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

**Mikhail V. Ivanov**, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor of the Department of Economics and management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

Статья поступила в редакцию 11.05.2020 г.

УДК 656.62:338.585

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.107>

## ОСОБЕННОСТИ ОБОСНОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА РЕЧНЫХ ПРИЧАЛОВ ПРЕДПРИЯТИЙ

**М.В. Никулина**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8973-4101>*

**В.А. Подобед**

*Учебный центр охраны труда, г. Мурманск, Россия*

*Аннотация. Актуальность статьи вытекает из необходимости повышения роли внутреннего водного транспорта в общей транспортной системе путем адекватного обоснования эффективности разных видов транспорта и переключения перевозок грузов на речной транспорт. Ставится задача обоснования эффективности строительства причалов, принадлежащих предприятиям, для перегрузки грузов, тяготеющих к речному транспорту. В статье приводится методика определения источников экономии расходов грузовладельцев при привлечении грузов на речной транспорт по всей логистической цепочке, в том числе, с учетом вынужденного строительства предприятиями собственных терминалов ввиду наблюдающейся тенденции смены местоположения или полного отсутствия портов общего пользования. Даются сведения о результатах апробации методики на примере АО «Выксунский металлургический завод».*

*Ключевые слова: речной транспорт, привлечение грузов, источники эффективности, затраты грузовладельца, оценка результатов*

### Введение

Общеизвестно, что транспорт играет важнейшую роль в обеспечении и развитии народного хозяйства. Транспортный комплекс страны включает в себя много видов транспорта, в том числе, тесно конкурирующих между собой – автомобильного, водного и железнодорожного. При современной модели экономики основу грузовых перевозок в России составляют три ключевых вида транспорта – трубопроводный, железнодорожный и автомобильный, в то время, как роль внутреннего водного транспорта существенно снизилась и не превышает 1,5% с учетом трубопроводного транспорта и 1,7% – без него [1], несмотря на низкую себестоимость перевозок по некоторым родам грузов и направлениям. Эта проблема стала настолько острой, что была отмечена В.В. Путиным на заседании президиума Госсовета РФ в Волгоградской области по вопросу развития внутренних водных путей [2].

Такая роль речного транспорта, на наш взгляд, не соответствует интересам народного хозяйства и является результатом неадекватной оценки как водного, так и других видов транспорта. Например, при работе других видов транспорта потребляется значительно большее количество энергии при перемещении грузов. Это означает, что необходимо все виды транспорта оценивать более объективно, исходя из интересов народного хозяйства и государства. Это – с одной стороны. А с другой – выявлять резервы повышения конкурентности и эффективности водного транспорта, в том числе, и в направлении привлечения грузов, тяготеющих к речному транспорту.

В связи с этим, в данной статье ставится задача обоснования эффективности строительства причалов, принадлежащих предприятию, для перегрузки грузов, тяготеющих к речному транспорту. Такой подход является одним из вариантов привлечения грузов на речной транспорт. На наш взгляд, этот подход будет полезен и для отечественных исследований и разработок, которые становятся актуальными по следу-

ющим причинам. Во-первых, число портов и номенклатуры перерабатываемых грузов продолжает сокращаться. Во-вторых, устойчиво прослеживается тенденция смены местоположения портов общего пользования, в том числе, по экологическим причинам. В-третьих, когда в районе местоположения предприятия нет портов или причалов общего пользования или стоимость перегрузки велика. В этих условиях более эффективным становится использование собственного терминала, тем более, если его можно построить в пределах границ расположения предприятия или рядом. По указанным выше причинам, число терминалов предприятий растёт как в нашей стране, так и за рубежом, в том числе, исходя из стратегий снижения затрат и улучшения качества обслуживания и управления цепочками поставок [3,4,5].

### **Краткий анализ методов оценки инвестиционных затрат и результатов**

Создание собственного терминала требует капитальных вложений и обязательно определения оценки инвестиционных затрат. В советское время эффективность любых мероприятий оценивалась минимумом приведенных затрат. В общем случае – это сумма годовых эксплуатационных расходов и капитальных затрат, умноженных на нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, утверждаемый правительством по различным объектам строительства и вложений [6]. Использование такого критерия в тех условиях хозяйствования было оправданным и относительно простым [6].

Напротив, в условиях современной модели хозяйствования эффективность инвестиций оценивается многими показателями, основными из которых являются [7]: интегральный эффект или чистая текущая стоимость; срок окупаемости не дисконтированный и дисконтированный; внутренняя норма доходности или внутренняя рентабельность. Все перечисленные показатели определяются с учетом рисков [7, 8, 9].

В общем случае эффект определяется дисконтированной разностью между результатами и затратами за весь период эксплуатации объекта. При этом затраты включают в себя как эксплуатационные расходы, так и капитальные вложения, которые можно рассчитать по существующим методикам или определить сметой затрат по строительству объекта. В этом плане затраты на строительство причала и расходы на его эксплуатацию не представляют особых затруднений и поэтому в данной статье не рассматриваются.

Более сложной проблемой является определение результатов, которые зависят от характера проекта, а, следовательно, для их определения используются различные методы.

В литературе, например [9], методы оценки результатов имеют общий, однообразный характер и основываются на поисках источников эффективности за счет снижения расходов, повышения доходов, увеличения объемов производства, повышения качества и цены продукции и других. При этом не приводятся конкретные методы определения этих показателей. Напротив, в работе [10] такие методы были приведены при оценке эффективности информационных технологий. Этот подход и был концептуально положен в основу оценки капитальных затрат на строительство причалов.

### **Особенности определения источников эффективности**

Источниками эффективности при использовании собственного причала могут быть два. Первый – это экономия от переработки и доставки грузов в случае перехода с причала общего пользования на собственный причал. Такая экономия может возникнуть, если предприятие уже осуществляло перевозки речным транспортом. Второй – это экономия в результате переключения перевозок грузов с других видов транспорта на речной. Эффект от первого источника может быть невелик, но оба эти источника сумми-

руются в случае привлечения дополнительных объемов перевозок грузов на речной транспорт и перехода с причала общего пользования на собственный.

Логичным является предположение о том, что любая экономия при смене вида транспорта должна рассчитываться исходя из интересов предприятия (грузовладельца, грузоотправителя). При этом при выборе вида транспорта учитывается не только стоимость перевозки, выраженная через фрахтовую или тарифную ставки, но и скорость доставки грузов, стоимость накопления и хранения грузов в пунктах отправления, прибытия и на складе предприятия и так далее по всей логистической цепочке в долговременной перспективе [11,12]. При этом скорость доставки грузов влияет на величину отвлечения оборотных средств грузовладельца, заложенных в стоимости грузов или связанного капитала. Поэтому стоимость перевозки одним видом транспорта между двумя пунктами для грузов разной стоимости будет неодинаковой.

### Методы определения экономии при использовании речного транспорта

Экономия или результат от использования речного транспорта или привлечения на него грузов определяется по следующему выражению:

$$P_T = \sum_1^T (\mathcal{E}_{гр}^o - \mathcal{E}_{гр}^e + C) \alpha_t, \quad (1)$$

где  $T$  – нормативный срок эксплуатации причала, лет;

$\mathcal{E}_{гр}^o$  – расходы грузовладельца на перевозку, подвоз, вывоз, накопление, хранение одной тонны груза, на связанный капитал по железнодорожному или автомобильному транспорту, руб./т;

$\mathcal{E}_{гр}^e$  – то же, по водному транспорту, руб./т;

$C$  – экономия при переходе с причала общего пользования на собственный, руб./т;

$\alpha_t$  – коэффициент дисконтирования, доли ед.:

$$\alpha_t = (1 + d)^{-t}, \quad (2)$$

где  $d$  – доходная ставка или норма дисконта, рассчитанная с учетом возможных рисков [7], доли ед.

Расходы грузовладельца по разным видам транспорта рассчитываются одинаково по следующему выражению:

$$\mathcal{E}_{гр}^{o(e)} = F_r(c) + \sum_1^N f(c)_n + \sum_1^2 c_{тр} + \sum_1^3 oc_{кр}, \quad (3)$$

где  $F_r(c)$  – фрахтовая (тарифная) ставка за перевозку одной тонны груза, руб./т;

$f(c)_n$  – дополнительные расходы, не входящие во фрахтовую (тарифную) ставку, в том числе на грузовые работы в начальном, конечном пунктах, перевалку в пути и другие прочие расходы, руб./т;

$N$  – количество статей дополнительных расходов, ед.;

$c_{тр}$  – расходы на подвоз и вывоз груза к водным причалам и грузовым железнодорожным станциям автомобильным транспортом в пунктах отправления и назначения груза (могут отсутствовать), руб./т;

$oc_{кр}$  – затраты на отвлечение оборотных средств, связанных с доставкой одной тонны груза, за время нахождения груза в пунктах накопления (отправления и назначения) и в пути, руб./т.

Расходы грузовладельца на подвоз и вывоз груза к водным причалам и грузовым железнодорожным станциям автомобильным транспортом определяются по следую-

щему выражению:

$$c_{\text{тр}} = f_a^{\text{п}} + f_a^{\text{в}}, \quad (4)$$

где  $f_a^{\text{п}}, f_a^{\text{в}}$  – соответственно, фрахтовые ставки за подвоз и вывоз груза автомобильным транспортом в пунктах отправления и назначения, руб./т.

Расходы на оплату связанного капитала (оборотных средств, привлеченных для перевозки одной тонны груза), определяются как сумма оборотных средств для пунктов накопления (отправления и назначения) и за время нахождения груза в пути следования.

Для пункта отправления груза эти расходы определяются по следующему выражению:

$$oc_{\text{кр}}^{\text{о}} = 0,5 \cdot Ц_{\text{гр}}^{\text{о}} \left( (1 + k_{\text{кр}})^{\frac{Q_a}{g_{\text{сут}} \cdot 365}} - 1 \right), \quad (5)$$

где  $oc_{\text{кр}}^{\text{о}}$  – затраты на отвлечение оборотных средств, связанных с доставкой одной тонны груза, в пункте отправления, руб./т;

$Ц_{\text{гр}}^{\text{о}}$  – стоимость груза в пункте отправления, руб./т;

$k_{\text{кр}}$  – величина кредитной ставки, принятая при краткосрочном кредитовании, доли ед.;

$Q_a$  – эксплуатационная загрузка транспортного средства (судна, железнодорожного состава, автомобиля), т;

$g_{\text{сут}}$  – суточный объем отправок груза, т.

Затраты на отвлечение оборотных средств, связанных с доставкой одной тонны груза, в пункте назначения (прибытия) груза определяются по выражению:

$$oc_{\text{кр}}^{\text{н}} = 0,5 \cdot Ц_{\text{гр}}^{\text{н}} \left( (1 + k_{\text{кр}})^{\frac{Q_a}{g_{\text{сут}} \cdot 365}} - 1 \right), \quad (6)$$

где  $oc_{\text{кр}}^{\text{н}}$  – затраты на отвлечение оборотных средств, связанных с доставкой одной тонны груза, в пункте назначения, руб./т;

$Ц_{\text{гр}}^{\text{н}}$  – стоимость груза в пункте назначения, руб./т;

$Q_a$  – загрузка автомобиля в пункте назначения груза, т.

Затраты на отвлечение оборотных средств, связанных с доставкой одной тонны груза, за время нахождения его в пути определяются по выражению:

$$oc_{\text{кр}}^{\text{п}} = Ц_{\text{гр}}^{\text{п}} \left( (1 + k_{\text{кр}})^{\frac{t_{\text{п}}}{365}} - 1 \right), \quad (7)$$

где  $oc_{\text{кр}}^{\text{п}}$  – затраты на отвлечение оборотных средств, связанных с доставкой одной тонны груза, за время его нахождения в пути, руб./т;

$Ц_{\text{гр}}^{\text{п}}$  – средняя стоимость груза (определяется как среднее значение стоимости груза в начальном и конечном пунктах), руб./т;

$t_{\text{п}}$  – время нахождения груза в пути с учетом путевых стоянок (без времени накопления в начальном и конечном пунктах), сут.

Как видно из выражения (3), стоимость перевозки может существенно зависеть не только от скорости перевозки, но и от величины кредитной ставки, ценности груза и других факторов.

Далее, имея значения результата, а также все другие значения, необходимые для

оценки показателей экономической эффективности инвестиционных проектов [7] (капитальных затрат, расходов на перегрузку грузов и прочих прямых расходов), можно оценить эффективность речного транспорта.

Рассмотренный выше подход был апробирован на примере привлечения на водный транспорт металлолома для АО «Выксунский металлургический завод» из трех пунктов зарождения грузопотока: Чебоксары, Нижний Новгород, Дзержинск (Нижегородская область). Результаты расчетов приведены в таб. 1.

Таблица 1

**Результаты расчетов совокупных расходов грузовладельцев по видам транспорта**

Пункт отправления	Объем отправления, тыс. т/год	Совокупные расходы по видам транспорта, млн. руб./год			Экономия, млн. руб./год
		Автомобильный	Железнодорожный	Водный	
Чебоксары	130		229,9	211,5	18,4
Нижний Новгород	200	417,2		290,7	126,5
Дзержинск	100		138,3	130,1	8,2
Итого	430	417,2	368,2	632,3	153,1

С учетом экономии на перегрузочных работах при эксплуатации собственного причала общая величина результата (экономии) составила 172,9 млн. руб./год, дисконтированный срок окупаемости – 3,7 лет.

Из приведенных данных видно, что на примере только одного предприятия и только трех грузопотоков становятся очевидными преимущества использования речного транспорта на доставке грузов предприятиям даже в условиях значительных инвестиций в проектирование и строительство собственных терминалов. Подобные выводы прослеживаются и в других аналогичных исследованиях [13,14,15].

**Заключение**

Все изложенное выше позволяет утверждать следующее.

1. Представленная методика является составной частью технико-экономических обоснований и дополняет их в части более адекватной оценки речного транспорта.

2. Речной транспорт может быть конкурентным по сравнению с автомобильным и железнодорожным видами транспорта по отдельным грузам и направлениям, и, тем не менее, остаётся невостребованным в полной мере. Преимущество речного транспорта, на наш взгляд, в отечественных исследованиях и обоснованиях освещается недостаточно.

3. Уровень снижения затрат при переходе с других видов транспорта на речной может обеспечивать строительство собственных причалов и их окупаемость.

4. Эффективность речного транспорта будет повышаться по мере стабилизации экономики страны и снижения ключевой, а, следовательно, и кредитных ставок и усиления регулятивных функций государства в интересах народного хозяйства.

**Список литературы:**

1. Тузов К. Грузовые перевозки в России: обзор текущей статистики. / Тузов К., Сабельников И. – Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики. Аналитический центр при правительстве Российской Федерации. – Выпуск № 53, сентябрь 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/24196.pdf> (дата обращения: 23.04.2020)

2. Заседание президиума Госсовета по вопросу развития внутренних водных путей от 15 августа 2016 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/52713> (дата обращения: 22.02.2018)

3. Stock RJ, Lambert MD. Strategic Logistics Management, 4th Edition. – McGraw-Hill, New York, 2001. – PP. 872.
4. Mangan J, Lalwani Ch, Butcher T. Global Logistics and Supply Chain Management. – John Wiley&Sons, Ltd, 2008. – PP. 372.
5. Christopher M. Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Costs and Improving Service, 2nd Edition. – Financial Times/Prentice Hall, 1999. – PP. 288.
6. Комплексная оценка эффективности мероприятий, направленных на ускорение научно-технического прогресса. Методические рекомендации. Утверждены постановлением ГК СССР по науке и технике, Академии наук СССР 03.1988 г. №80/52. М.: 1989. – с. 118.
7. Виленский, П.Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика: учеб. пособие / П.Л. Виленский, В.Н. Лившиц, С.А. Смоляк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дело, 2002. – 888 с.
8. Viera Bartošová, Peter Majerčák, Dagmar Hrašková. Taking Risk into Account in the Evaluation of Economic Efficiency of Investment Projects: Traditional Methods: Article (International Conference on Applied Economics, ICOAE 2015, 2-4 July 2015, Kazan, Russia). – Procedia Economics and Finance 24 (2015) by Elsevier B.V. – p. 68-75 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/283954077\\_Taking\\_Risk\\_into\\_Account\\_in\\_the\\_Evaluation\\_of\\_Economic\\_Efficiency\\_of\\_Investment\\_Projects\\_Traditional\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/283954077_Taking_Risk_into_Account_in_the_Evaluation_of_Economic_Efficiency_of_Investment_Projects_Traditional_Methods) (дата обращения: 21.04.2020)
9. Фатхутдинов, Р.А. Управленческие решения: учебник /Р.А. Фатхутдинов; 6-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА, 2009. – 344 с.
10. Платов Ю.И. Оценка эффективности использования информационных технологий на речном транспорте. / Ю.И. Платов, М.В. Никулина. – Вестник Волжской гос. академии водного транспорта. Вып. 52. – Н.Новгород: изд. ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с. 165–173.
11. Waters D. Global Logistics and Distribution Planning: Strategies for Management, 1st Edition. – CRC Press, 1999. – PP. 416.
12. Kramberger T., Potočan V., Ipravec V. Sustainable Logistics and Strategic Transportation Planning. – Business Science Reference, 2016. – PP. 532.
13. Min-Ho Ha, Zaili Yang, Jasmine Siu Lee Lam. Port performance in container transport logistics: A multi-stakeholder perspective // Transport Policy, Volume 73, January 2019, P. 25–40.
14. Ильющенко И.Г., Сяньюй У., Лисин А.А. Организационно-экономические и методологические предпосылки формирования сети транспортно-логистических центров (ТЛЦ). – Вестник Волжской гос. академии водного транспорта. Вып. 58. – Н.Новгород: изд. ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019. – с. 107–115.
15. Tempelmeier H. Inventory service-levels in the customer supply chain, in: OR-Spektrum 22 (2000), PP. 361–380.

## **THE FEATURES OF EFFECTIVENESS SUBSTANTIATION FOR CONSTRUCTION OF RIVER PIERS OF ENTERPRISES**

**Marina V. Nikulina**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

<https://orcid.org/0000-0002-8973-4101>

**Vitaly A. Podobed**

*Occupational safety training center, Murmansk, Russia*

*Abstract. The relevance of the article arises from the need to increase the role of inland water transport in the general transport system by adequately effectiveness substantiation of different kinds of transport and switching cargo transportation to river transport. The aim is to substantiate the effectiveness of the piers construction owned by enterprises to overload goods. The article gives a methodology for determining the sources of cost savings for cargo owners when attracting goods to river transport along the entire logistics chain, including taking into account the forced construction of their own terminals by enterprises due to the observed location change or the complete absence of public ports. The information of the methodology testing results on the example of JSC «Vyksa Metallurgical Plant» is given.*

*Keywords: river transport, cargo attraction, sources of efficiency, cargo owner's costs, evaluation of results*

## References:

1. Tuzov K. Gruzovye perevozki v Possii: obzor tekushei statistiki. / Tuzov K., Sabelnikov I. – Bulletin o tekushix tendenciakh rossiiskoi ekonomiki. Analiticheskii centr pri pravitelstve Rossiiskoi Federacii. – Vipusk № 53, sentiabr 2019 [Elektronniy resurs]. – Regim dostupa: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/24196.pdf> (data obrasheniya: 23.04.2020)
2. Zasedanie prezidiuma Gossoвета po voprosu razvitiya vnutrennix vodnix putei ot 15 avgusta 2016 g. [Elektronniy resurs]. – Regim dostupa: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/52713> (data obrasheniya: 22.02.2018)
3. Stock RJ, Lambert MD. Strategic Logistics Management, 4th Edition. – McGraw-Hill, New York, 2001. – PP. 872.
4. Mangan J, Lalwani Ch, Butcher T. Global Logistics and Supply Chain Management. – John Wiley&Sons, Ltd, 2008. – PP. 372.
5. Christopher M. Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Costs and Improving Service, 2nd Edition. – Financial Times/Prentice Hall, 1999. – PP. 288.
6. Komplekshaia ocenka effektivnosti meropriyatii, napravlennix na uskorenie nauchno-tekhnicheskogo progressa. Metodicheskie rekomendacii. Utverzheni postanovleniem GK SSSR po nauke i tekhnike, Akademii nauk SSSR 03.1988 g. №80/52. M.: 1989. – s. 118.
7. Vilenskii, P.L. Ocenka effektivnosti investitsionnix proektov: teoriya i praktika: ucheb. posobie / P.L. Vilenskii, V.N. Livshic, S.A. Smoliak. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Delo, 2002. – 888 s.
8. Viera Bartošová, Peter Majerpák, Dagmar Hrašková. Taking Risk into Account in the Evaluation of Economic Efficiency of Investment Projects: Traditional Methods: Article (International Conference on Applied Economics, ICOAE 2015, 2-4 July 2015, Kazan, Russia). – Procedia Economics and Finance 24 (2015) by Elsevier B.V. – p. 68-75 [Elektronniy resurs]. – Regim dostupa: [https://www.researchgate.net/publication/283954077\\_Taking\\_Risk\\_into\\_Account\\_in\\_the\\_Evaluation\\_of\\_Economic\\_Efficiency\\_of\\_Investment\\_Projects\\_Traditional\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/283954077_Taking_Risk_into_Account_in_the_Evaluation_of_Economic_Efficiency_of_Investment_Projects_Traditional_Methods) (data obrasheniya: 21.04.2020)
9. Fatxutdinov, R.A. Upravlencheskie resheniya: uchebnik /R.A. Fatxutdinov; 6-e izd., pererab. i dop. – M.: INFRA, 2009. – 344 s.
10. Platov Y.I. Ocenka effektivnosti ispolzovaniya informacionnix tekhnologii na rechnom transporte. / Y.I. Platov, M.V. Nikulina. – Vestnik Volgskoi gos. akademii vodnogo transporta. Vip. 52. – N.Novgorod: izd. FGBOU VO «VGUBT», 2017.- s. 165-173.
11. Waters D. Global Logistics and Distribution Planning: Strategies for Management, 1st Edition. – CRC Press, 1999. – PP. 416.
12. Kramberger T., Potočan V., Ipavec V. Sustainable Logistics and Strategic Transportation Planning. – Business Science Reference, 2016. – PP. 532.
13. Min-Ho Ha, Zaili Yang, Jasmine Siu Lee Lam. Port performance in container transportlogistics: A multi-stakeholder perspective // Transport Policy, Volume 73, January 2019, P. 25–40.
14. Iliushenko I.G., Sian`uy U., Lisin A.A. Organizatsionno-ekonomicheskie i metodologicheskie predposilki formirovaniya seti transportno-logisticheskix centrov (TLC). – Vestnik Volgskoi gos. akademii vodnogo transporta. Vip. 58. – N.Novgorod: izd. FGBOU VO «VGUBT», 2019.- s. 107-115.
15. Tempelmeier H. Inventory service-levels in the customer supply chain, in: OR-Spektrum 22 (2000), PP.361-380.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Никулина Марина Владимировна**, к.т.н., доцент, доцент кафедры управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: [marina\\_platnik@rambler.ru](mailto:marina_platnik@rambler.ru)

**Подобед Виталий Александрович**, к.т.н., доцент «Учебного центра охраны труда», г. Мурманск (АНОДО «УЦОТ»), 183053, г. Мурманск, ул. Крупской, 26, e-mail: [v.a.podobed@mail.ru](mailto:v.a.podobed@mail.ru)

**Marina V. Nikulina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Economics and Management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951 e-mail: [marina\\_platnik@rambler.ru](mailto:marina_platnik@rambler.ru)

**Vitaly A. Podobed**, Dr. Sci. Tech, Associate Professor of Occupational safety training center, 26, Krupskaya st., Murmansk, 183053,

Статья поступила в редакцию 25.06.2020 г.

УДК 656.62:330.4

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.108>

## **НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ АДЕКВАТНОСТИ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА РЕЧНОМ ТРАНСПОРТЕ**

**А.Ю. Платов**

*Нижегородский архитектурно-строительный университет,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**Ю.И. Платов**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация. Одним из очевидных условий применимости экономико-математических моделей является адекватное отражение ими транспортных процессов. Вопрос адекватности должен решаться отдельно для каждой конкретной модели. Однако в случае моделирования для речного флота можно говорить о существовании традиционных подходов к построению моделей, которые являются устаревшими и приводящими к неадекватности всех таких моделей. Показано, что предлагаемые модели не отражают в полной мере свойств транспортного процесса, а следовательно, использование их на практике может приводить к значительным погрешностям планирования работы флота. Дается анализ типичных ошибок при построении моделей для планирования работы флота.*

*Показано, что при разработке моделей планирования работы флота в других странах гораздо лучше учитываются практические потребности водного транспорта, несмотря на существование более совершенных частных отечественных моделей.*

*Исходя из современных реалий эксплуатации речного флота и возможностей ИТ, формулируется несколько необходимых условий, которым должны удовлетворять практически применимые модели.*

*Ключевые слова: экономико-математические методы на речном транспорте, адекватность моделирования, оптимизация планирования работы флота, эксплуатационные расходы, средние величины, управляемые и неуправляемые денежные потоки, модели линейного программирования*

### **Введение**

В XXI веке дальнейшее повышение эффективности всех сфер экономики и государственного управления определяет цифровизация, главной составляющей которой является использование информационных технологий (ИТ) и экономико-математических методов (ЭММ).

Очевидной проблемой в сфере разработки и совершенствования ЭММ является практически полное отсутствие внедрений на речном транспорте. Цифровизация в речной сфере ограничивается задачами учёта, сбора данных и мониторинга. Причин у такого положения дел несколько. В настоящей статье рассматривает одна из таких причин, которая состоит в неадекватности ЭММ, предлагаемых в современных исследованиях.

### **Развитие ЭММ в водной отрасли и проблемы с их внедрением**

Наиболее ранняя публикация, посвящённая планированию работы флота, датируется 1954 г. [1]. В нашей стране для речного флота метод планирования впервые был предложен в 1959 г. В.И. Савиным. В течение 60-х трудами Волового Д.И., Зачёсова В.П., Ирхина А.П., Савина В.И., Падни В.А., Постнова А.В., Фомкинского Л.И., Хей-

феца М.Б. и др. был создан ряд ЭММ, ориентированных на некоторые важнейшие задачи управления работой флота. Первый полный, включающий в свой состав все необходимые модели метод автоматизированного планирования был разработан В.И. Савиным в конце 60-х годов и предназначался для расчёта графика движения флота [2].

Сложности с реализацией таких ЭММ на компьютерах 60-х и 70-х обусловили, с одной стороны, развитие эвристических методов решений, которые, тем не менее, остались на бумаге, а с другой стороны – вероятностного подхода к планированию операций [3], на который возлагались большие надежды. В 80-х годах работы продолжались в рамках применения автоматизированных систем в целом в системе МРФ РСФСР.

Подавляющее большинство разработок ЭММ в отечественном речном транспорте представляли собой модели линейного программирования и были ориентированы на распределение судов в рамках некоторого календарного периода.

За рубежом исследования по применению ЭММ велись, в основном, для морских перевозок [4]. В центре внимания зарубежных исследователей были, в основном, две задачи: планирования маршрутов судов (ship routing) и календарного планирования (ship scheduling). Высокая степень неопределённости, присущая зарубежному трамповому судоходству обусловила большее развитие эвристических алгоритмов планирования, а также имитационных моделей. Потребность в регулировании движения через шлюзованную систему верхнего течения Миссисипи, а также в оптимизации судопропуска обусловила разработку в 70-х ряда имитационных моделей [5]. Наиболее ранняя была создана в 1971 г. [6], а в 1976 г. была разработана комплексная модель [7], которая используется для исследований до сих пор [8]. Исследования по машинной имитации речных перевозок в нашей стране имели эпизодический характер.

В СССР попытки автоматизации и оптимизации планирования были доведены только до уровня опытной эксплуатации, а в реальной практике не использовались длительное время [9, 10]. Причём, проблемы с внедрением ЭММ стали предметом обсуждения уже в середине 80-х в ряде статей руководителей разработок по АСУ: Н.Г. Коки, В.И. Савина, А.С. Бутова, В.В. Неволлина.

Ситуация с внедрением ЭММ в других странах имела те же черты. За рубежом имеется ряд исследований [11, 12, 13, 14], из которых следует, что системы поддержки принятия решений на морском транспорте в отличие от авиа- и железнодорожного транспорта практически не развиты, а немногочисленные разработки так и не получили практического применения.

Основные проблемы, связанные с внедрением в практику планирования работы флота и перевозок, возникали в сфере информационного обеспечения, встраивания ЭММ в существующие механизмы управления, а также неадекватности моделей практике управления. Однако этот отрицательный опыт, к сожалению, в настоящее время критически не рассматривается.

Современные разработки ЭММ для решения эксплуатационных задач на речном транспорте являются лишь данью определенной моде и по существу только имитируют применение ЭММ. Эти разработки, несмотря на их внешнее разнообразие, не отличаются от сформулированных еще в советское время моделей линейного программирования. Они копируют их с небольшими изменениями и при этом не учитывают многие факторы, такие как отрицательный опыт использования ЭММ в советское время, особенности функционирования транспорта в рыночной экономике, методические принципы хозяйствования и управления. Их общей характеристикой является неадекватность моделирования реальному транспортному процессу, основные задачи планирования которого имеют нелинейный динамический характер. Это является одной из основных причин их невостребованности в эксплуатационных расчетах при планировании перевозок и работы флота.

### **Признаки неадекватности современных ЭММ**

Неадекватность моделирования может быть условно сведена к следующим взаимовлияющим группам, которые можно найти, например, в «типичных» моделях, опубликованных в последние годы [15, 16, 17, 18].

Во-первых, полностью игнорируется субъектность при выборе критерия и ограничениях. Типичный пример: целевая функция – минимум расходов по флоту и портам, которые принадлежат разным юридическим субъектам. Также осуществляется оперирование параметрами, относящимися к разным объектам и процессам (суммируется время, имеющее разную стоимость).

Во-вторых, в целевых функциях, ограничениях, зависимостях и переменных используются средние величины (ставки содержания судов в ходу и на стоянках, стоимость других объектов и т.д.). При этом при оптимизации используются как управляемые, так и неуправляемые денежные потоки.

В-третьих, в отдельных моделях не учитываются значимые факторы, существенно влияющие на эффективность принятия решений. Например, игнорирование влияния связанного капитала, т.е. стоимость груза и время перевозки приводят к неверным и ошибочным результатам при выборе вида транспорта и вариантов перевозок грузов с участием разных видов транспорта.

В-четвёртых, разрабатываются почти исключительно объёмные статические модели, в которых суда фигурируют только как количества судов данного типа, а время присутствует только как период работы всего флота.

Приведенные группы факторов, по нашему мнению, не только отрицательно влияют на результаты оптимизации, но и сводят на нет эффективность применения ЭММ.

### **Неадекватность ЭММ при игнорировании субъектности**

Игнорирование субъектности при применении ЭММ даже в плановой экономике не приводила к успешному внедрению на практике с использованием строгих методов оптимизации [19]. В плановой экономике при взаимодействии различных структур, входящих в одну систему (отрасль или предприятие), имелась общая главная цель, но разные локальные интересы. Такая ситуация была характерна для системы смежных пароходств по обмену флотом Центрального и Северо-Западного бассейнов. Общая цель – сокращение обратных порожних пробегов судов, независимо от их принадлежности к тому или иному пароходству, входящих в одну отрасль. Также общая цель присутствовала при ускорении обработки судов в портах, принадлежащих одному пароходству (в таких портах не обязательно обрабатывались только собственные суда). Взаимодействие таких систем успешно обеспечивалось с помощью механизмов согласованного управления, закрепленных в соответствующих положениях по обмену флотом и обработки судов и предусматривающих как возмещение затрат, так и систему штрафов и поощрений. Формализовать взаимодействия таких субъектов при применении ЭММ в плановой экономике оказалось невозможным, а при оптимизации графика движения флота в пароходствах Центрального и Северо-Западного бассейнов не удавалось согласовывать интересы отдельных пароходств, в результате чего расчет графика приходилось осуществлять в диалоговом режиме. Эта оптимизация была реализована только в пароходстве «Волготанкер» [20], но это был один субъект, что является дополнительным подтверждением важности учёта субъектности. Однако для рыночных условий для разных субъектов, имеющих разные интересы, критерии и целевые функции в моделях продолжают оставаться общими [15, 16, 17, 18], что приводит к невозможности реализовать результаты оптимизации практически и даже теоретически.

### **Неадекватность ЭММ при использовании средних величин**

Использование средних и неуправляемых параметров не препятствует внедрению ЭММ, но существенно снижает эффективность оптимизации и в некоторых случаях даже приводит к неверным результатам. Критика использования средних величин приводилась и ранее, в литературе советского периода, когда требования к этим величинам были менее жесткие. Так, в [21] показано, что использование вариации различных производственных показателей, т.е., по существу, отказ от средних величин, существенно повышает эффективность методов математического программирования. Справедливости ради следует заметить, что на речном транспорте уже на ранних стадиях применения ЭММ такая проблема была обнаружена. Так, при расчете графика движения Савиным В.И. были сделаны методические предложения по расчету времени движения судов и составов в зависимости от условий плавания [2]. В этой же работе были предложены и многие вычислительные методы других параметров транспортного процесса при формировании конкретных маршрутов. К сожалению, в дальнейшем это направление не нашло продолжения, по нашему мнению, из-за ограниченных возможностей тогдашних ЭВМ, отсутствия и прекращения методических разработок в связи с переходом на применение статистических норм следования судов и составов.

Нами теоретически доказано и практически подтверждено [9, 22], что на современном этапе развития информационных технологий наиболее эффективно и целесообразно использование аналитических норм следования судов и составов. Более того, в [23] показано, что в некоторых случаях применение среднесуточных расходов по судну при моделировании не только снижает эффективность последних, но и приводит к неверным результатам.

### **Неадекватность ЭММ при учёте неуправляемых величин**

Неверные результаты при реализации ЭММ могут быть получены также при использовании в ЭММ расходов и доходов, в которых присутствуют как управляемые, так и неуправляемые денежные потоки. Из экономической литературы известно, что при принятии решений должны учитываться предстоящие затраты и причем только такие, на которые можно воздействовать. Исходя из этого, при разработке моделей необходимо использовать только те статьи расходов, доходов и других параметров, на которые может повлиять реализация той или иной ЭММ. Классификация потоков по уровню управляемости является относительной и зависит от характера модели оптимизации. Например, при расстановке судов по грузопотокам и минимизации расходов к неуправляемым можно отнести такие статьи расходов, как амортизация, расходы на ремонт, на оплату труда и отчисления на социальные нужды. К управляемым необходимо отнести расходы на топливо и смазку, так как расстановка судов при выполнении заданного объема перевозок грузов может оптимизировать только их. Поэтому и целью в данной задаче является снижение расходов на топливо и смазку. Принимая же за цель все эксплуатационные расходы, можно достигнуть не снижения расходов на топливо и смазку, а получить некую фиктивную оптимизацию.

Для пояснения этого вывода можно привести следующие рассуждения. В настоящее время эксплуатируются как новые, так и возрастные суда. При примерно равной грузоподъемности и провозной способности новые суда характеризуются большей величиной амортизационных отчислений и меньшими расходами на топливо и смазку (в основном, за счет использования более дешевого судового топлива) при прочих примерно равных других расходах. При любой расстановке расходы по амортизационным отчислениям остаются одинаковыми, т.е. в данном случае это неуправляемые расходы. Очевидно, что решая, например, задачу по расстановке судов по грузопотокам по минимуму расхода топлива, новые суда будут первыми расставлены на грузопотоки и с большими объемами, а старые при освоении заданных объемов новыми

судами могут остаться невостребованными, при этом минимум расходов по топливу будет обеспечен. В ситуации, когда за критерий будут приняты все расходы по судам, результат будет противоположным предыдущему, «оптимизация» будет мнимой, а расход топлива по всем судам будет большим по сравнению с первым вариантом.

### **Неадекватность при использовании линейных моделей**

Логично утверждать, что отказ от использования средних величин и учет особенностей статей расходов при использовании их в моделях существенно усложняет последние, увеличивает трудоемкость расчетов, но позволяет рассматривать эти модели как полезные для практического применения. К усложнению приводит также учет значимых факторов, которые существенно влияют на эффективность получаемых результатов реализации моделей. Так, учет связанного или оборотного капитала при выборе вида транспорта, как показано в работе [24], кардинально влияет на эффективность принятия решения при перевозке грузов. Учет же этого фактора приводит к нелинейности модели.

Очевидно, что оставаться в рамках линейных моделей при построении адекватных ЭММ невозможно. Поэтому могут быть только два решения: либо усложнение модели с переходом на нелинейные или имитационные модели, либо отказ от её использования и применение традиционного вариантного метода расчетов. В противном случае создается видимость «научного» подхода в использовании ЭММ. Такая же видимость и абстрактность возникает и при игнорировании субъектности, так как здесь возникает вопрос неуправляемости, то есть воздействия на параметры, контролируемые различными субъектами.

### **Обсуждение**

Невнимание в отрасли отечественного речного транспорта к этим, на наш взгляд, очевидным положениям мы можем объяснить лишь снижением уровня научных исследований в сфере эксплуатации речного транспорта. Учебные дисциплины в вузах водного транспорта, связанные с ЭММ, основаны на материале 70-х годов и не способствуют исправлению ситуации.

Вопрос об использовании средних величин в зарубежной литературе даже не упоминается. Следует заметить, что в современных зарубежных исследованиях оптимизация расхода топлива, предполагающая прямое вычисление всех параметров рейса, занимает довольно заметное место [25]. Это связано не только с высокими ценами на топливо, но и в значительной степени с вопросами экологии. Также следует заметить, что в иностранной литературе используются либо простые кубические аппроксимации часового расхода топлива [25, 26, 27, 28], либо степенные регрессии [29, 30], либо регрессии на основе обучаемых нейронных сетей [31]. Поэтому можно уверенно утверждать о превосходстве отечественного задела по моделированию движения судов для задач нормирования времени следования и расхода топлива, который, тем не менее, остаётся невостребованным в отечественных исследованиях и разработках.

### **Выводы**

На основании приведённых соображений можно сформулировать несколько требований, которым должны удовлетворять современные ЭММ.

Во-первых, большая изменчивость экономических условий работы требует календарного планирования и динамической корректировки планов. Время 70-х, когда объёмные линейные и статические модели казались приемлемыми для планирования, прошло. Неадекватность таких моделей многократно показана практически. Для паромов с несколькими десятками судов объёмное планирование просто бессмысленно.

Во-вторых, индивидуализация всех расчётов. Суда должны фигурировать поимённо. Расчёты затрат, всех операций должны проводиться для каждого судна по отдельности с привязкой к календарным датам. Это можно сделать только с применением дискретного имитационного моделирования, либо на основе дискретных нелинейных моделей.

В-третьих, отказ от средних затрат по типу судна. Необходим прямой расчёт времени следования и расхода топлива каждого судна с учётом переменных условий плавания на участках водных путей, календарных окон судопропуска. Предельно ясно, что основной вид затрат транспортного процесса должен рассчитываться и планироваться максимально точно. Методы средних удельных по времени затрат в ходу и на стоянке скрывают неэффективность работы судов и не позволяют оптимизировать работу флота.

В-четвёртых, критерии оптимальности должны быть привязаны исключительно к параметрам конкретного юридического лица.

Конечно, проблемы внедрения ЭММ не исчерпываются вышеописанными вопросами. Однако сформулированные четыре положения являются необходимыми условиями, невыполнение которых гарантирует неадекватность ЭММ и, следовательно, их полную практическую непригодность.

#### Список литературы:

1. Danzig G.B. Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule / G.B. Danzig, D.R. Fulkerson // *Naval Research Logistics Quarterly*, 1954, No 1. Pp. 217–222.
2. Савин В.И. Расчёт графика движения на электронно-вычислительных машинах. В.И. Савин – М.: Транспорт, 1968, 216 с.
3. Пьяных С.М. Экономико-математические методы оптимального планирования работы речного транспорта. С.М. Пьяных – М.: Транспорт, 1988, 253 с.
4. Barnhart, C. *Handbooks in Operations Research and Management Science: 14 Transportation* / C. Barnhart, G. Laporte (eds). Amsterdam: Elsevier, 2007.
5. Mundy, R.A. *Management Systems for Inland Waterway Traffic Control* / R.A. Mundy, J.F. Campbell. Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, 2005.
6. Caroll, J.L. Simulation of Waterway Transport Systems / J.L. Caroll, M.S. Bronzini. *Transportation Engineering Journal*, Vol. 97, No. 3, August 1971. Pp. 527–539.
7. Bronzini, M. S. *Inland Navigation System Analysis* / M. S. Bronzini. Vol. 5. CACI, Inc., U.S. Army Corps Engineers, Washington, D.C., 1976.
8. *Waterway Analysis Model (WAM). User Manual. Shallow Draft Version, NESP Reports*. Huntington, West Virginia, 2007.
9. Платов А.Ю., Платов Ю.И. Проблемы внедрения аналитических информационных технологий на речном транспорте. *Наука и техника транспорта* / Москва, №3, 2010. С. 42–45.
10. Платов А.Ю., Платов Ю.И. Проблемы применения систем поддержки принятия решений на речном транспорте. *Речной транспорт (XXI век)*. 2018. № 1 (85). С. 22–24.
11. Ronen, D. *Cargo Ships Routing and Scheduling: Survey of Models and Problems* / D. Ronen // *European Journal of Operational Research*, 1983, No 12. Pp. 119-126.
12. Ronen, D. *Ship Scheduling: The Last Decade* / D. Ronen // *European Journal of Operational Research*, 1993, No 71. Pp. 325-333 .
13. Mohammed Al-Yakoob, Salem. *Mixed-integer mathematical programming optimization models and algorithms for an oil tanker routing and scheduling problem* / Salem Mohammed Al-Yakoob. Dissertation for PhD in Math., Virginia Polytechnic Institute, Virginia, 1997.
14. Christiansen, M. *Maritime Transport Optimization: An Ocean of Opportunities* / M. Christiansen, K. Fagerholt, G. Hasle, A. Minsaa, B. Ny-green. *OR/MS Today*, April, 2009, Pp. 26–31.
15. Альпидовский А.Д., Шабров, В.Н. Экономико-математическая модель оптимизации доставки партии автомобилей от «двери до двери». *Вестник ВГАВТ. Н.Новгород: Изд-во «ФГБОУ ВО «ВГУВТ»*, 2016. – Вып. – № 49 – С. 220–228.
16. Телегин А.И. Шабров, В.Н. Модель транспортно-экспедиционного обеспечения сквозной доставки партий автомобилей «от двери до двери» с участием речного транспорта. / *Речной транспорт (XXI век)*. – 2017.– № 2 (60).

17. Абдулатипов, М.А., Калачев В.К. Оптимизация числа караванов судов за период ледовой проводки. Вестник ВГАВТ. 2017. №51.-С. 93–98.
18. Абдулатипов, М.А. Иванов В.М. Экономико-математическая модель текущего планирования ледокольных проводок в морском бассейне / Вестник ВГАВТ. 2018. №54.-С. 79–85.
19. Пьяных, С.М. Автоматизация расчета графика движения флота в пароходствах центрального и северо-западного бассейнов на ЕС ЭВМ / С.М. Пьяных, Н.В. Пигалова // Труды / ГИИВТ. – Горький, 1981. – Вып. 187. – С. 3–10.
20. Платов, Ю.И. Первая очередь АСУ пароходства «Волготанкер» / Ю.И. Платов // Передовой опыт и новая техника / ЦБНТИ. М., 1976. – Вып. 3 (27). С. 3–7.
21. Авилов В.А. Математико-статистические методы технико-экономического анализа производства. М. «Экономика», 1967, 264 с.
22. Платов А.Ю. Система автоматизированного расчета норм времени следования и расхода топлива / А.Ю. Платов, Ю.И. Платов, А.Г. Малышкин, С.Г. Смирнов // Наука и техника на речном транспорте / ФГУП ЦБНТИ Минтранса РФ. – М., 2003. – С. 80–84.
23. Платов А.Ю., Платов Ю.И. О современных методах бизнес-планирования работы речного флота. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта, 2018. – № 54. – С. 110–116.
24. Никулина М.В., Никифорова Д.Д., Платов Ю.И. Обоснование критерия выбора вида транспорта для грузовых перевозок. Труды конгресса «Великие реки», 2018 г., вып. 7. «Проблемы использования инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек».
25. Harilaos N. Psaraftis and Christos A. KontovasGreen. Green Maritime Transportation: Speed and Route Optimization. Transportation Logistics The Quest for Win-Win Solutions. Springer International Publishing Switzerland, 2016. Pp. 299–351.
26. Ronen D. Effect of oil price on the optimal speed of ships. Journal of the Operational Research Society, 33 (11), 1982, Pp. 1035–1040.
27. Barras B. Ship design and performance for masters and mates. Oxford: Elsevier, 2004.
28. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A.: Ship Resistance and Propulsion Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2011.
29. Kowalski, A. Cost optimization of marine fuels consumption as important factor of control ship's sulfur and nitrogen oxides emissions. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, 2013, 36(108) z. 1 Pp. 94–99.
30. Shrady D.A., Smith G.K., Vassian R.B. Predicting Ship Fuel Consumptions. Naval Postgraduate School, 1996. Pp. 70.
31. Miyeon Jeon, Yoojeong Noh, Yongwoo Shin, O-Kaung Lim, Inwon Lee, Daeseung Cho Prediction of ship fuel consumption by using an artificial neural network / Journal of Mechanical Science and Technology 32 (12) (2018) Pp. 5785-5796.

## **NECESSARY CONDITIONS FOR THE ADEQUACY OF ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELS ON RIVER TRANSPORT**

**Alexander Y. Platov**

*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia*

**Yury I. Platov**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. One of the obvious conditions for the applicability of economic and mathematical models is their adequate reflection of transport processes. The issue of adequacy should be decided separately for each specific model. However, in the case of modeling for the river fleet, we can talk about the existence of traditional approaches to building models that are outdated and lead to inadequacy of all such models. It is shown that the proposed models do not fully reflect the properties of the transport process, and, therefore, their use in practice can lead to significant errors in the planning of the fleet. The analysis of typical errors in the models construction for the fleet planning is given.*

*It is shown that when developing models of fleet planning in other countries, the practical needs of water transport are much better taken into account, despite the existence of more*

*advanced private domestic models. Based on the modern realities of the operation of the river fleet and IT capabilities, several necessary conditions are formulated, which must be satisfied by practically applicable models.*

*Keywords: economic and mathematical methods on river transport, modeling adequacy, optimization of fleet operation planning, operating costs, average values, controlled and uncontrolled cash flows, linear programming models*

#### References:

1. G.B. Danzig, D.R. Fulkerson D.R. Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule, Naval Research Logistics Quarterly, 1954, No 1. Pp. 217-222.
2. Savin V.I. Raschet grafika dvizheniya na elektronno-vychislitel'nykh mashinakh. – M.: Transport, 1968.
3. P'yanykh S.M. Ekonomiko-matematicheskie metody optimal'nogo planirovaniya raboty rechnogo transporta. – M.: Transport, 1988.
4. Barnhart C., G. Laporte G. Handbooks in Operations Research and Management Science: 14 Transportation. Amsterdam: Elsevier, 2007.
5. Mundy, R.A. Campbell J.F. Management Systems for Inland Waterway Traffic Control, Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, 2005.
6. Caroll J.L., Bronzini M.S. Simulation of Waterway Transport Systems Transportation Engineering Journal, Vol. 97, No. 3, August 1971: 527-539.
7. Bronzini M. S. Inland Navigation System Analysis. Vol. 5. CACI, Inc., U.S. Army Corps Engineers, Washington, D.C., 1976.
8. Waterway Analysis Model (WAM). User Manual. Shallow Draft Version, NESP Reports. Huntington, West Virginia, 2007.
9. Platov A.Yu., Platov Yu.I. Problemy vnedreniya analiticheskikh informatsionnykh tekhnologiy na rechnom transporte. Nauka i tekhnika transporta, Moskva, №3, 2010: 42-45.
10. Platov A.Yu., Platov Yu.I. Problemy primeneniya sistem podderzhki prinya-tiya resheniy na rechnom transporte. Rechnoy transport (XXI vek). 2018. № 1 (85): 22-24.
11. Ronen D. Cargo Ships Routing and Scheduling: Survey of Models and Problems, European Journal of Operational Research, 1983, No 12: 119-126.
12. Ronen D. Ship Scheduling: The Last Decade, European Journal of Operational Research, 1993, No 71: 325-333 .
13. Mohammed Al-Yakoob, Salem. Mixed-integer mathematical programming optimization models and algorithms for an oil tanker routing and scheduling problem. Dissertation for PhD in Math., Virginia Polytechnic Institute, Virginia, 1997.
14. Christiansen M., Fagerholt K., Hasle G., Minsaa A., Ny-green. B. Maritime Transport Optimization: An Ocean of Opportunities, OR/MS Today, April, 2009, Pp. 26-31.
15. Al'pidovskiy A.D., Shabrov V.N. Ekonomiko-matematicheskaya model' opti-mizatsii dostavki partii avtomobiley ot «dveri do dveri». Vestnik VGAVT. N.Novgorod: Izd-vo «FGBOU VO «VGUVT», 2016. Vyp. № 49 – Pp. 220228.
16. Telegin A.I. Shabrov, V.N. Model' transportno-ekspeditsionnogo obespeche-niya skvoznoy dostavki partiy avtomobiley «ot dveri do dveri» s uchastiem rechnogo transporta. Rechnoy transport (XXI vek). 2017.– № 2 (60).
17. Abdulatipov M.A., Kalachev V.K. Optimizatsiya chisla karavanov sudov za period ledovoy provodki. Vestnik VGAVT. 2017. №51.-Pp. 93-98.
18. Abdulatipov M.A. Ivanov V.M. Ekonomiko-matematicheskaya model' tekushche-go planirovaniya ledokol'nykh provodok v morskome bassejne. Vestnik VGAVT. 2018. №54.-Pp. 79-85.
19. P'yanykh, S.M., Pigalova N.V. Avtomatizatsiya rascheta grafika dvizheniya flota v parokhodstvakh tsentral'nogo i severo-zapadnogo basseynov na ES EVM. Trudy GIIVT. – Gor'kiy, 1981. – Vyp. 187. – Pp. 3-10.
20. Platov Yu.I. Pervaya ochered' ASU parokhodstva «Volgotanker».Peredovoy opyt i novaya tekhnika, TsBNTI. M., 1976. – Vyp. 3 (27): 3-7.
21. Avilov V.A. Matematiko-statisticheskie metody tekhniko-ekonomicheskogo analiza proizvodstva. M. «Ekonomika», 1967.
22. Platov A.Yu., Platov Yu.I., Malyshkin A.G., Smirnov S.G. Sistema avtomatizirovannogo rascheta norm vremeni sledova-niya i raskhoda topliva. Nauka i tekhnika na rechnom transporte, FGUP TsBNTI Mintransa RF. – M., 2003. – Pp. 80-84.

23. Platov A.Yu., Platov Yu.I. O sovremennykh metodakh biznes-planirovaniya raboty rechnogo flota. Vestnik VGAVT, 2018. – N 54. – Pp. 110-116.
24. Nikulina M.V., Nikiforova D.D., Platov Yu.I. Obosnovanie kriteriya vy-bora vida transporta dlya gruzovykh perevozok. Trudy kongressa «Velikie reki», 2018 g., vyp. 7. «Problemy ispol'zovaniya innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek».
25. Harilaos N. Psarafitis and Christos A. Kontovas. Green Maritime Transportation: Speed and Route Optimization. Transportation Logistics The Quest for Win-Win Solutions. Springer International Publishing Switzerland, 2016: 299-351.
26. Ronen D. Effect of oil price on the optimal speed of ships. Journal of the Operational Research Society, 33 (11), 1982, Pp. 1035–1040.
27. Barras B. Ship design and performance for masters and mates. Oxford: Elsevier, 2004.
28. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A.: Ship Resistance and Propulsion Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2011.
29. Kowalski A. Cost optimization of marine fuels consumption as important factor of control ship's sulfur and nitrogen oxides emissions. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, 2013, 36(108) z. 1 Pp. 94–99.
30. Shrady D.A., Smith G.K., Vassian R.B. Predicting Ship Fuel Consumptions. Naval Postgraduate School, 1996: 70.
31. Miyeon Jeon, Yoojeong Noh, Yongwoo Shin, O-Kaung Lim, Inwon Lee, Daeseung Cho Prediction of ship fuel consumption by using an artificial neural network / Journal of Mechanical Science and Technology 32 (12) (2018): 5785-5796.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Платов Александр Юрьевич**, д.т.н., доцент, зав. кафедрой прикладной информатики и статистики, Нижегородский архитектурно-строительный университет (ФГОУ ВО «ННГАСУ»), 603950, Н.Новгород, ул. Ильинская, 65, e-mail: platoff@mail.ru

**Платов Юрий Иванович**, д.т.н., проф., профессор кафедры управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: platov1@yandex.ru

**Alexander Y. Platov**, Dr. Sci. Tech, head of Applied Informatics and Statistic Chair, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Ilyinskaya st., Nizhny Novgorod, 603950

**Yury I. Platov**, Dr. Sci. Tech, professor of Transport Management Chair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 02.03.2020 г.

УДК 656.673

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.109>

## АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА К ГРУЗОВОМУ РЕЧНОМУ ТЕРМИНАЛУ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ ПЕРЕГРУЗКИ И СКЛАДИРОВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**А.И. Телегин**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**С.И. Нюркин**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**А.В. Нюркин**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация. Изучение возможностей грузовых речных терминалов для складирования и перегрузки автотранспортных средств на речные суда/с речных судов. Описание сегодняшней ситуации на транспортном рынке страны и примеры организации комбинированных перевозок генеральных грузов с участием сухопутных (автомобильного и железнодорожного) видов транспорта в развитых в транспортном отношении странах. Информация о ситуации на транспортном рынке нашей страны. Предложения по привлечению речного транспорта к организации комбинированных перевозок. Имеющаяся база – флот, береговые терминалы. Существующие требования и регламенты, применимые к таким терминалам. Их анализ и проекция на дальнейшее развитие перевозок высокотарифицированных генеральных грузов в комбинированных сообщениях с участием речного транспорта.*

*Ключевые слова: генеральные грузы, высокотарифицированные грузы, контрейлерные перевозки, грузовые речные терминалы, требования к грузовым речным терминалам, технический регламент № 623, безопасность грузовых речных терминалов, комбинированные схемы перевозки грузов, складирование, перевалка, перегрузка автотранспортных средств на речные суда.*

### Введение

Выбор направлений развития различных видов транспорта страны базируется на проекте «Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» [1], президентском «Перечне поручений по итогам заседания президиума Госсовета по вопросу развития внутренних водных путей», адресованного Собранию Российской Федерации [2], а также на широком спектре документов, определяющих перспективные направления развития общества и экономики России, ее отдельных регионов, транспортной системы страны в целом и отдельных видов транспорта, в том числе и водного, на законодательных и иных нормативных правовых актах. Так же «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года» [3] и «Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» [4] нацеливают специалистов транспорта на повышение роли речного транспорта в обеспечении потребностей предприятий и населения РФ в безопасных и качественных перевозках и транспортных услугах. На сегодняшнем этапе развития экономики страны приоритетной теоретической и практической задачей для речной транспортной отрасли является привлечение и переключение на речной транспорт высокотарифицированных генеральных грузов, доставля-

емых в навигационный период в настоящее время во многих направлениях, параллельных внутренним водным путям, автомобильным и (или) железнодорожным транспортом, а также возобновление и развитие комбинированных перевозок с участием судоходных компаний речного транспорта. На это нацеливают и решения Государственного совета по транспорту (август 2016 года в г. Волгоград), где в ходе обсуждения транспортных проблем страны было указано на неиспользуемые большие резервы пропускной способности существующих внутренних водных путей во многих регионах [2].

После приватизации речных портов страны в 1990-е годы поступление, перегрузка и перевозка таких грузов происходит в весьма ограниченных объемах, лишь эпизодически, как правило, в адрес производственных предприятий и населения, расположенных, в основном в северных районах страны, не имеющих развитых сухопутных путей сообщения. Так в целом за 2017 год речной транспорт Российской Федерации перевез 118,5 млн.т. грузов, в том числе: 52% – строительные навалом; 14% – нефтепродукты наливом; 9% – зерно насыпью; 5% – лесные грузы в пакетах; остальные – металлы, удобрения, прочее [5].

Выдвигаемое грузовладельцами требование обеспечения доставки без перегрузки в пути следования сделало автотранспорт фактически монополистом при транспортировке генеральных грузов. Повсеместное внедрение грузовладельцами логистических подходов в организации своей деятельности, в частности доставка грузов на условиях «от двери до двери», дало автотранспортным предприятиям дополнительное преимущество в конкурентной борьбе с другими видами транспорта, так как только автотранспорт может самостоятельно выполнить это условие. На практике резко увеличилась средняя дальность перевозок грузов автотранспортом и, как следствие, возросла транспортная составляющая в цене большого числа товаров. Многие автомобильные трассы исчерпали свою пропускную способность, ухудшилось состояние дорожного полотна, вследствие чего снизились скорости движения автомобилей и грузовых автопоездов. Кроме этого, увеличение количества автотранспорта и времени его нахождения на дорогах, значительно увеличивает содержание вредных выбросов в атмосферу, усугубляя неблагоприятную экологическую обстановку на планете.

Во многих развитых в транспортном отношении странах предприятия железнодорожного транспорта предложили организовать контрейлерные перевозки грузов, когда подготовленный грузоотправителем автомобильный полуприцеп и/или прицеп значительную часть пути перемещается на железнодорожной платформе. При этом обеспечивается транспортировка самих грузов без перегрузочных операций в пути, и выполняется доставка грузов по системе «от двери до двери», а сама такая перевозка грузов с участием железнодорожного транспорта способна сократить транспортные издержки грузовладельцев [6,7,8].

Такой способ транспортировки различных грузов активно используется на трансальпийских маршрутах, и где местные администрации ограничивают перемещение автопоездов по автодорогам. Аналогичный способ снижения стоимости транспортировки грузов на большие расстояния активно используется в США и в Австралии.

Железнодорожный транспорт нашей страны также приступил к развертыванию практических работ в этом направлении. Спроектированы и построены специализированные платформы, позволяющие размещать на них груженный автоприцеп или автопоезд, не выходящий за пределы железнодорожного габарита. При использовании на сети РЖД стандартных платформ для перевозки, в том числе автотехники, груженный автофурами подвижной состав не вписывается в разрешенный габарит железнодорожного пути и приближения строений. Необходимость использования специализированных платформ так же обоснована и наличием контактной сети на большинстве транзитных железнодорожных магистралей нашей страны.

На транспортном рынке РФ в настоящее время перевозимые автотранспортные средства (автомобили легковые и грузовые, автобусы, фургоны, съемные кузова и др.)

за редким исключением, доставляются от производителей (отправителей) до покупателей (получателей) автомобильным транспортом (или самоходом) или железнодорожным транспортом в специализированных вагонах и на универсальных неспециализированных платформах. Встает обоснованный вопрос о целесообразности переключении таких грузопотоков на соответствующих направлениях на комбинированные перевозки с участием речного транспорта по примеру развитых в транспортном отношении стран [6,7,8].

#### **Анализ технического регламента «О безопасности объектов внутреннего водного транспорта» № 623**

Для реализации таких перевозок необходимы грузовые речные терминалы для складирования и перегрузки автотранспортных средств на речные суда/с речных судов, необходимо также выяснить какие нормативные требования существуют к таким терминалам.

В настоящее время специализированных грузовых терминалов для складирования и перегрузки автотранспорта в большинстве речных портов нет. Эпизодические случаи погрузки/выгрузки на суда/с судов автотранспортных средств возникают в основном в портах Сибири, и они осуществляются в основном с помощью имеющейся крановой техники с применением соответствующих грузозахватных устройств. Кроме этого, например, в составе флота Обь-Иртышского речного пароходства имеются баржи-площадки проекта 16801 и проекта 942М, оборудованные аппаратами, которые позволяют производить погрузку-выгрузку колесной автотранспортной техники по методу накатки-выкатки, называемой «Ро-Ро» (логистический термин, образованный от английского Roll-on / Roll-off – в переводе означает закатывать / выкатывать), на которых так же эпизодически перевозятся автомобильные средства. В некоторых других судоходных компаниях, работающих в восточных бассейнах, также имеются отдельные суда-площадки, переоборудованные силами собственных технических служб, и эпизодически используются для погрузки, перевозки и выгрузки колесной техники (в основном как паромы).

Имеющиеся на сегодняшний день требования к грузовым речным терминалам приведены в нормативном документе – техническом регламенте «О безопасности объектов внутреннего водного транспорта», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 12-го августа 2010 года № 623 [9].

Настоящий документ применяется «в целях защиты жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного или муниципального имущества от опасности, источником которой может стать деятельность внутреннего водного транспорта и связанная с ним инфраструктура, охрана окружающей среды, жизни и здоровья животных и растений, предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей объектов регулирования, а так же обеспечения энергетической эффективности»[9(п.3)]. В соответствии с ним все существующие объекты портовой береговой транспортной инфраструктуры, включая проведение работ по их текущей эксплуатации, должны выполняться в соответствии с требованиями, приведенными в данном документе. Их выполнение обязательно как для персонала, занятого эксплуатацией речных грузовых терминалов, так и федеральными органами исполнительной власти, осуществляющими государственный надзор и контроль.

Практическая реализация данных требований должна обеспечить комплексную безопасность и эффективность при эксплуатации объектов речного транспорта.

Необходимые требования к безопасности грузовых речных терминалов при проектировании, строительстве и эксплуатации с точки зрения выполнения операций перегрузки и складирования автотранспортных средств подробно изложены в ряде пунктов (400, 433(г), 457(д), 461, 462, 469) текста технического регламента [9]. Анализ информации, приведенной в соответствующих пунктах, показал, что:

1. В целях обеспечения безопасности транспортируемого автомобильного тоннажа (груженых и/или порожних контейнеров) они должны быть размещены на причале на специально оборудованных площадках с соблюдением минимально допустимых разрывов между единицами хранения в одном ряду и между рядами. Для предотвращения возникновения пожара при большом скоплении контейнеров их размещение на причале должно быть организовано по секциям с соблюдением противопожарных проездов шириной шесть и более метров.

2. Все причалы, перегружающие различную колесную технику и в том числе контейнеры, при строительстве необходимо дооборудовать колесоотбойными устройствами на кордоне, которые в процессе эксплуатации причала должны содержаться в исправном состоянии.

3. Большое внимание уделяется вопросам безопасности при выполнении перегрузочных операций с колесной техникой (в нашем случае с груженными и/или порожними контейнерами) и при организации крепления этой техники на судне.

4. Реализуемые в настоящее время правительственные документы нацеливают транспортный комплекс страны на повышение роли речного транспорта, прежде всего, за счет переключения на воду части высокотарифицированных генеральных грузов, перевозимых в навигационный период на многих направлениях, параллельных внутренним водным путям, автомобильным и/или железнодорожным транспортом [3,4].

5. Одним из перспективных потоков генеральных грузов, которые могут быть переклочены на комбинированные схемы доставки по системе «от двери до двери», с участием речного транспорта являются автотранспортные средства (автомобили легковые и грузовые, автобусы, фургоны, съемные кузова и другие), перевозимые в настоящее время по автомобильным или железнодорожным путям сообщений.

6. В настоящее время действующих специализированных грузовых терминалов для складирования и перегрузки автотранспорта на суда/с судов в речных портах страны нет и они не проектируются. Перегрузки отдельных одиночных средств, особенно в портах Сибири, осуществляется с помощью имеющейся крановой техники, или на малоприспособленных причальных сооружениях, не отвечающих требованиям по безопасности, изложенным в техническом регламенте.

7. С 2010 года действует технический регламент «о безопасности объектов внутреннего водного транспорта» (№ 623), сферой применения которого являются: защита личного имущества граждан, а также имущества предприятий и организаций, осуществляющих производственную или иную разрешенную деятельность; а также имущества, принадлежащего муниципальным и/или государственным организациям от опасностей, источником которых может являться деятельность предприятий и организаций внутреннего водного транспорта и связанная с ним инфраструктура [9].

8. В соответствии с данным документом все береговые объекты на берегах рек, озер и водохранилищ, используемые для перегрузочных операций, как-то: отдельные причалы и портовые причальные сооружения относятся к объектам регулирования.

9. В отдельных пунктах технического регламента приведены необходимые требования по обеспечению безопасной деятельности грузовых речных терминалов, как при перегрузке и складировании автотранспортных средств, так и при эксплуатации самих терминалов. То есть требования регламентируют необходимые условия обеспечения безопасности, как к самим причалам, к их причальным сооружениям при обслуживании судов, так и к соблюдению требований по противопожарной и экологической безопасности при размещении «колесной техники» на территории самого причала. Например, в п. 461 приведены безопасные условия и приемы перегрузки «колесной техники» на причале.

### Заключение

Учитывая, что других нормативных положений по организации складирования «колесной техники», ее погрузки в речные суда, выгрузки из речных судов, не разработано, следует закономерный вывод, что данный технический регламент не рассматривает вопросы погрузки своим ходом автотранспортных средств в суда, таким же способом выгрузку из судов, то есть по системе «Ро-Ро», что давно уже практикуется в зарубежных морских и речных портах.

Следовательно, исследования по обоснованию оптимальных технологических схем и средств погрузки-выгрузки автотранспортных средств, в том числе и контроллеров через грузовые причалы речных портов Российской Федерации, являются весьма актуальными, так как их результаты могут способствовать появлению на транспортном рынке страны нового сегмента грузовых перевозок привлекательного для речных портов и судоходных компаний.

### Список литературы:

1. «Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» [Электронный ресурс], режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/aaooFKSheDLiM99HEcyrygtfmGzrnAX.pdf>;
2. «Перечень поручений по итогам заседания президиума Госсовета по вопросу развития внутренних водных путей», 2016 [Электронный ресурс], режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/52871>;
3. «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс], режим доступа: <https://www.mintrans.gov.ru/documents/2/1009>;
4. «Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс], режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/8910>;
5. Транспорт в России – 2018. Стат. Сборник./Росстат. – М.: 2018. – 101 с.
6. Sladkowi A. Pamula T. Intelligent transportation systems – problems and perspectives. Springer, Studies in Systems Decision and Control, Volume 32, Switzerland, 2016, 303 p.
7. Jaromir Siroky. The Trends of Road Trailers Systems for Railways // Parners Contacts. 2012, vol. 8, no. 4, pp. 137–151.
8. Jaromir Siroky. Operating Costs Profitability of the System of Semi-trailers Transportation by Rail // Global Journal For Research Analysis. 2014, vol. 3, no.1, pp. 119–120.
9. Технический регламент «о безопасности объектов внутреннего водного транспорта», утвержденный Постановлением Правительства Российской Федерации от 12 августа 2010 года № 623.

## ANALYSIS OF TECHNICAL REGULATIONS REQUIREMENTS TO THE CARGO RIVER TERMINAL FOR THE SAFE HANDLING AND STORAGE OF MOTOR VEHICLES

**Anatoly I. Telegin**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Sergey I. Nyurkin**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Andrey V. Nyurkin**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. It is the study of river cargo terminals possibilities for storing and reloading vehicles on river vessels / from river vessels. Description of the current situation on the country's transport market and examples of the organization of combined transport involving road and rail transport for the transport of general cargo in transport-developed countries are given. Proposals for attracting river transport to the organization of combined transport have been made. The available base is the fleet, coastal terminals. Existing requirements and regulations applicable to such terminals are shown. Their analysis and projection on the further*

*development of transportation of highly tariffed general cargo in combined communications with the participation of river transport are made.*

*Keywords: general cargo, high-costing cargo, river cargo terminals, contrail transportation, requirements for river cargo terminals, technical regulations No. 623, security of cargo river terminals, combined schemes of cargo transportation, storage, handling, overloading of vehicles on river vessels*

#### **References:**

1. «Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» Web: <http://static.government.ru/media/files/aaofKSheDLiM99HEcyrygytfmGzrnAX.pdf>;
2. «Perechen' poruchenij po itogam zasedaniya prezidiuma Gossoвета po voprosu razvitiya vnutrennih vodnyh putej», 2016 god Web: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/52871>;
3. «Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda» Web: <https://www.mintrans.gov.ru/documents/2/1009>;
4. «Strategiya razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda» Web: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/8910>;
5. Transport v Rossii – 2018. Stat. Sbornik./Rosstat. – M.: 2018. – 101 s.
6. Sladkowi A. Pamula T. Intelligent transportation systems – problems and perspectives. Springer, Studies in Systems Decision and Control, Volume 32, Switzerland, 2016, 303 p.
7. Jaromir Siroky. The Trends of Road Trailers Systems for Railways // Parners Contacts. 2012, vol. 8, no. 4, pp. 137-151.
8. Jaromir Siroky. Operating Costs Profitability of the System of Semi-trailers Transportation by Rail // Global Journal For Research Analysis. 2014, vol. 3, no.1, pp. 119-120.
9. Tekhnicheskij reglament «o bezopasnosti ob'ektov vnutrennego vodnogo transporta», utverzhdenyj Postanovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 12 avgusta 2010 goda № 623.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Телегин Анатолий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Нюркин Сергей Иванович**, к.т.н., доцент кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Нюркин Андрей Владимирович**, аспирант кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

e-mail: [nyur@inbox.ru](mailto:nyur@inbox.ru)

**Anatoly I. Telegin**, Doctor of technical science, Professor of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport,

5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

**Sergey I. Nyurkin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport,

5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

**Andrey V. Nyurkin**, postgraduate of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport,

5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

Статья поступила в редакцию 28.04.2020 г.

УДК 656.62:330.4

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.110>

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМИРОВАНИЯ ХОДОВОГО ВРЕМЕНИ И РАСХОДА ТОПЛИВА ДЛЯ РЕЧНЫХ СУДОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

**И.В. Уставщиков**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация: В статье дан краткий анализ нормирования времени следования судов и составов и расхода топлива на речном транспорте России и за рубежом. Для этих целей на современном этапе цифровизации для повышения эффективности работы судов наиболее целесообразно использование существующих современных методов расчета норм следования и расхода топлива судов и составов с учётом условий плавания на участках водных путей на момент моделирования. В статье рассмотрены направления совершенствования нормирования на основе предлагаемой автором автоматизированной судовой системы контроля, для работы которой судно оснащается дополнительным стандартным оборудованием. Система обеспечивает контроль основных параметров двигателя и скорости хода по участкам водных путей и расхода топлива. Показана эффективность её функционирования. Для существенного повышения эффективности нормирования обозначены необходимые методические, алгоритмические и программные разработки.*

*Ключевые слова: нормирование ходового времени судов и расхода топлива; совершенствование нормирования, участки водных путей, модель оптимизации ходового времени, автоматизированная судовая система контроля, эффективность системы контроля.*

### Введение

На современном этапе одним из главных направлений повышения конкурентоспособности речного транспорта является использование аналитических информационных технологий (ИТ) и экономико-математических методов (ЭММ) [1,2]. В свою очередь, это требует совершенствования методов нормирования, особенно при моделировании, календарном планировании и оперативном управлении работой флота в нашей стране и за рубежом [1,2,3,4,5,6]. Нормирование времени ходовых операций и расхода топлива является одной из центральных проблем в сфере управления речным транспортом. Однако нормирование ходового времени и расхода топлива осуществлялось раздельно и использовались как расчётные, так и статистические методы, которые имели большие погрешности, так как учитывали ограниченное число факторов. В современных условиях хозяйствования и цифровизации необходимо дальнейшее совершенствование этих параметров. Особо это актуально в условиях возрастания доли затрат на топливо, которая в зависимости от характера перевозок составляет от 50% и выше в прямых эксплуатационных расходах.

### Развитие методов нормирования

На системном уровне история развития и анализ методов нормирования на речном транспорте освещены в работе А.Ю. Платова [7]. В этой работе [7] показано, что совершенствованию нормирования работы флота всегда уделялось особое внимание, начиная с середины 30-х годов прошлого столетия и до настоящего времени. При совершенствовании нормирования для получения норм использовались как аналитиче-

ские зависимости, так и статистические методы. Степень использования норм, полученных разными путями в разные периоды, зависела от целей применения, числа судов, интенсивности их движения, уровня вычислительных средств. Опытнo-статистические нормы применялись, в основном, для планирования и оценки работы экипажей судов.

Создание современных расчётных методов нормирования связано с разработкой оптимизационных методов планирования работы флотов на основе ЭММ и началом процесса информатизации в рамках автоматизированных систем управления (АСУ) на речном транспорте. Однако главными взаимосвязанными недостатками статистических и расчётных норм были два. Первый вытекал из полного учета зависимости скорости движения судов от условий плавания и параметров судна. Второй связан с тем, что нормирование времени следования и расхода топлива судами было разделено на всех временных этапах развития и применения норм. Такое раздельное нормирование в современных условиях высоких и все возрастающих расходов на топливо является неэффективным. Исходя из этого обстоятельства, в анализируемой работе [7] предложен комплексный подход к нормированию, отвечающий современным условиям экономики и уровню развития вычислительных средств и ЭММ.

### **Современные методы нормирования и их совершенствование**

Авторами [1,2,7,8] теоретически доказано и практически подтверждено, что на современном этапе цифровизации наиболее целесообразно использование аналитических оптимальных норм следования и расхода топлива для судов и составов, что существенно повышает эффективность перевозок.

Следует заметить, что в зарубежных исследованиях оптимизация расхода топлива, предполагающая прямое вычисление всех параметров рейса с использованием различных зависимостей, занимает довольно заметное место [9,10,11,12,13]. Это связано не только с высокими ценами на топливо, но и, в значительной степени, с вопросами экологии.

Однако эти исследования в основном применимы для морских судов и не учитывают специфику речных водных путей, имеющих резко меняющуюся глубину, ширину разных участков и скорость течения, а, следовательно, резкое изменение как скорости судна, так и расхода топлива. Поэтому каждый водный путь должен быть разбит на элементарные участки, характеризующиеся относительно постоянными характеристиками: глубиной, скоростью течения, степенью стеснённости фарватера и другими данными.

Для определения скорости и расхода топлива речных судов в работе [7] предложены модели, которые, кроме условий плавания, учитывают и многие другие параметры. К ним относятся характеристики корпуса судна, движителя, двигателя.

Введение в расчёт времени следования и расхода топлива условий плавания и параметров судна в виде некоторых зависимостей и моделей движения судна позволяет существенно уменьшить неопределённость и повысить достоверность нормирования для оперативного управления работой флота.

Упрощенно эта модель имеет следующий вид.

Критерий модели формулируется в виде функции  $F(t_k)$ , значение и величина которой зависят от целей нормирования, и имеет экономический смысл (максимизация прибыли, минимизация прямых расходов, затрат на топливо, выполнение заданного времени прибытия, расписания прибытия пассажирских судов и т.д.). Продолжительность рейса будет находиться в некотором допустимом интервале, но всегда будет оптимальной.

Задача нормирования времени движения судна в общем случае выглядит следующим образом:

$$F(t_k) \rightarrow \min, \max, \quad (1)$$

$$t_k^{\min} \leq t_k \leq t_k^{\max}, \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^N t_k \leq T, \quad (3)$$

где  $k$  – номер элементарного участка,

$N$  – число элементарных участков,

$t_k$  – искомое время движения на каждом элементарном участке, которое определяется в интервале минимального и максимального времени движения по участку,

$T$  – заданное время рейса.

Минимальное время или максимальная скорость определяются с помощью специальных программ с учетом ограничений, диктуемых условиями плавания. Максимальное время или минимальная скорость находятся либо исходя из условий управляемости судна, либо из условия устойчивого режима работы главных двигателей или ограничений, диктуемых правилами плавания.

Ограничение (3) необходимо тогда, когда задано время прибытия судна в конечный пункт рейса.

Как отмечено в [1,2,7], применение таких моделей при нормировании повышает эффективность работы флота. Так, использование оптимальных норм времени следования и расхода топлива в 2004 г. [14, 15] в пароходстве «Волготанкер» позволило сократить расход топлива в среднем по всем перевозкам на 16% , в том числе на 7% – за счет оптимизации и на 9% – за счет повышения контроля за расходом топлива в результате использования таких норм.

### Необходимость совершенствования нормирования

Однако при современном уровне развития средств вычислительной техники, съёма и передачи данных возможно и необходимо дальнейшее совершенствование нормирования, а, следовательно, и повышение эффективности работы судов. Необходимость диктуется повышением точности или устранением погрешности, особенно для решения задач в реальном масштабе времени. Такие погрешности возникают по разным причинам. Одной из них является используемая структура разбивки водного пути на элементарные участки, которая содержит данные для полноводного (весеннего) и меженного периодов. Разность норм времени и расхода топлива, приведенная в сборниках [14,15], между весенними и меженными периодами в зависимости от участков и направления движения (вверх, вниз) по времени находится в пределах (3–17%), а по расходу топлива – в пределах (6–45%). Разный интервал отклонений для норм времени и расхода топлива объясняется кубической зависимостью расхода топлива от скорости движения судна [7]. При этом большие резкие изменения характерны для относительно небольших глубин и свободной реки (скорости течения), направления движения (вверх, вниз), с грузом или порожнем, что также вытекает из приведенных зависимостей [7]. Такая погрешность наиболее заметна на переходных периодах между весной и меженью, которые могут длиться на некоторых водных путях до трех месяцев и одновременно на разных участках следования судна могут быть высокие и низкие уровни воды и, соответственно, скорости течения. Кроме того, для каждого элементарного участка приняты усредненные глубины и скорости течения без учета их колебаний по длине участка, а также не учитываются существенные изменения глубин и скоростей течения внутри суток, связанные с расходом воды на ГЭС.

Вторым направлением снижения погрешности и повышения эффективности работы судов является переход на индивидуальное нормирование для каждого судна и состава. Метод [7] позволяет учитывать не только условия плавания, но и индивидуальные конструктивные и эксплуатационные особенности конкретных судов, а также изменения в процессе их эксплуатации, такие как изношенность корпуса и двигателя, обрастание корпуса, ветро-волновой режим, температура воды и воздуха. Однако нерешенной проблемой является учет этих особенностей при оперативном регулировании работы флота.

Третьим направлением повышения эффективности нормирования является контроль за соблюдением норм времени движения судна и расхода топлива как составной части нормирования, а также проверка степени адекватности расчетных оперативных норм фактическим величинам.

### **Возможность совершенствования нормирования**

Одно из направлений решения обозначенных выше проблем возможно на базе систем контроля отдельных эксплуатационных параметров судна. В настоящее время уже разработаны два варианта автоматических систем контроля некоторых эксплуатационных параметров. Первый позволяет непрерывно контролировать расход топлива путем определения уровня топлива в цистернах на каждый момент времени и снимать частоту вращения двигателя. Примером такой системы является система, разработанная ООО «ЭЛКОМ» [16]. Второй вариант позволяет непрерывно контролировать частоту вращения гребных валов и расход топлива, определять позицию судна, накапливать информацию при отсутствии возможности отправить ее на сервер. Эта система на основе статистики позволяет также осуществлять анализ потребления топлива и смазки при различных режимах хода судна с учетом фактической наработки механизмов по оборотам и мощности. Примером такой системы является «Система fleeteco» украинского предприятия Digital Technology Group [17]. Однако системы в обоих вариантах контролируют разные параметры и не обеспечивают контроля скорости судна, а, следовательно, не обеспечивают совершенствования нормирования.

Поэтому нами на основе анализа функций, выполняемых стандартным оборудованием, предлагается система [18], обеспечивающая решение обозначенных выше проблем. Эта система должна снимать, передавать на сервер посредством GSM и хранить при необходимости следующие параметры: обороты гребных валов, мощность дизель генераторов, расход топлива главными двигателями, скорость движения судна относительно воды и берега, запас воды под корпусом судна. Она же позволит в режиме ONLINE контролировать работу судна, автоматически вести историю показаний параметров во время выполнения судном каждого рейса отдельно. Для функционирования этой системы необходим следующий основной состав стандартного оборудования: судовой компьютер MC-7210-DC-CP-T; датчики частоты вращения главных двигателей SM-12 по числу двигателей; трансформаторы тока «ASK» по числу генераторов; интеллектуальные вихревые расходомеры Rosemount 8800D по числу главных и вспомогательных двигателей, а также, возможно, и котлов; антенна для передачи данных, COM-порт и аналогово цифровой преобразователь; модем для передачи GSM сигнала и др. Кроме того, используется стандартное оборудование судов, оснащенных гирокомпасом, лагом, эхолотом и GPS.

В первом приближении такую систему можно использовать для повышения эффективности нормирования в следующих направлениях. На основе контролируемых данных можно сравнивать фактическое время движения с нормативным, определяемым по модели (1–3), и сопоставлять все другие параметры с расчетными. На основе анализа полученной информации могут корректироваться исходные данные модели применительно к конкретному судну, т.е. будут учитываться его индивидуальные характеристики и более точные условия плавания на момент прохождения судном конкретных участков, что, в свою очередь, приведет к снижению погрешности нормиро-

вания, в том числе и за счет учета изменения глубин по периодам навигации и суточных колебаний. Это во-первых. А во-вторых, очевидным является и то, что система обеспечивает и контроль за соблюдением установленного режима выполнения каждого конкретного рейса путем непрерывного мониторинга и последующего регулирования движения в режиме «Online». Реализация только таких возможностей уже обеспечивает гарантированный экономический эффект. Нами в работе [16] рассчитана эффективность двух вариантов работы танкеров проекта 1577/550А на линиях Татьяна-Высоцк и Татьяна-Кавказ. На этих линиях в расчет были взяты только те участки водных путей, на которых гарантированно возможно получить экономию за счет регулирования режимов движения судна на основе ежесуточных перепадов уровней воды. Так, при стоимости дополнительного оборудования (включая и его монтаж) 1691 тыс. руб., экономический эффект за жизненный цикл на линии Татьяна-Высоцк составил 2398 тыс. руб., а на линии Татьяна-Кавказ – 5793 тыс. руб. с дисконтированными сроками окупаемости соответственно 3,5 и 1,79 года.

Как видно из приведённых данных, использование такой системы эффективно. Однако её возможности по повышению эффективности не исчерпываются для совершенствования нормирования в свете отмеченных выше задач. Однако, для этого необходимы методические, алгоритмические и программные разработки.

### Выводы и предложения

На основании изложенных выше доводов, можно сделать следующие выводы.

В большинстве судоходных предприятий методы нормирования и контроля ходового времени и расхода топлива не соответствуют современному уровню информационных технологий, несмотря на то, что они разработаны и проверены на практике. Для их реализации требуются следующие методические, алгоритмические и программные разработки.

Во-первых, в условиях цифровизации необходимо наличие автоматизированной системы с отслеживанием глубин и течений.

Во-вторых, требуется обеспечить нормирование времени движения конкретных судов и составов и расхода топлива с привязкой к календарному времени выполнения рейса, в том числе, прогнозирование подхода к ГЭС.

В-третьих, следует определять и выдавать необходимые судовые показатели контроля выполнения заданного режима движения с оценкой их погрешности.

В-четвертых, необходимо производить динамический пересчет режима движения с любого времени выполнения рейса в связи с изменением условий плавания и эксплуатационной обстановки. Для этого необходимо разработать соответствующие офисные модели, а возможно, и судовые.

### Список литературы:

1. Платов А.Ю., Платов Ю.И. Проблемы внедрения аналитических информационных технологий на речном транспорте. Наука и техника транспорта / Москва, №3, 2010. С. 42–45.
2. Платов А.Ю., Платов Ю.И. Проблемы применения систем поддержки принятия решений на речном транспорте. Речной транспорт (XXI век). 2018. № 1 (85). С. 22–24.
3. Mundy R.A. Management Systems for Inland Waterway Traffic Control / R.A. Mundy, J.F. Campbell. Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, 2005.
4. Caroll J.L. Simulation of Waterway Transport Systems / J.L. Caroll, M.S. Bronzini. Transportation Engineering Journal, Vol. 97, No. 3, August 1971. P. 527–539.
5. Ronen D. Cargo Ships Routing and Scheduling: Survey of Models and Problems / D. Ronen // European Journal of Operational Research, 1983, No 12. P. 119–126.
6. Ronen D. Ship Scheduling: The Last Decade / D. Ronen // European Journal of Operatio [28,29,30], nal Research, 1993, No 71. P. 325–333.
7. Платов А.Ю. Методология оперативного планирования работы речного грузового флота в современных условиях: дис. док. техн. наук: 05.22.19 / А.Ю. Платов. – Н.Новгород, 2010. – 314 с.

8. Малышкин А.Г., Платов А.Ю., Платов Ю.И., Смирнов С.Г. Система автоматизированного расчета норм времени следования и расхода топлива. Наука и техника на речном транспорте / ФГУП ЦБНТИ Минтранс РФ. – М., 2003. – С. 80–84.
9. Harilaos N. Psarafitis and Christos A. Kontovas. Green Maritime Transportation: Speed and Route Optimization. Transportation Logistics The Quest for Win-Win Solutions. Springer International Publishing Switzerland, 2016. PP. 299-351.
10. Ronen D. Effect of oil price on the optimal speed of ships. Journal of the Operational Research Society, 33 (11), 1982, pp. 1035–1040.
11. Barras B. Ship design and performance for masters and mates. Oxford: Elsevier, 2004.
12. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A.: Ship Resistance and Propulsion Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2011.
13. Kowalski A. Cost optimization of marine fuels consumption as important factor of control ship's sulfur and nitrogen oxides emissions. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, 2013, 36(108) z. 1 pp. 94–99.
14. Эксплуатационные нормативы для планирования работы транспортного флота. ООО «Волготанкер» АМС, Москва. 2003– 43 с.
15. Нормы расхода топлива для планирования работы транспортного флота. ООО «Волготанкер» АМС. Москва. 2003– 71 с.
16. Группа компаний ЭЛКОМ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: el-com.ru (дата обращения: 20.04.20)
17. Digital marine. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: digitalmarine.net (дата обращения: 10.04.20)
18. Уставщиков И.В. Регулирование режима движения грузового судна на базе системы контроля условий эксплуатации: маг. дис. 23.04.01 / И.В. Уставщиков. – Н.Новгород, 2018. – 95 с.

## **THE IMPROVEMENT OF RATIONING RUNNING TIME AND FUEL CONSUMPTION FOR RIVER VESSELS IN THE CONTEX OF DIGITALIZATION**

**Ivan V. Ustavshchikov,**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract: The article presents a brief analysis of rationing the time of passage of vessels and convoys and fuel consumption on river transport in Russia and abroad. To improve the efficiency of the river vessels at the current stage of digitalization, the usage of the existing modern methods of calculating the standards of navigation and fuel consumption of vessels and convoys is the most appropriate for these purposes, taking into account the conditions of navigation on sections of waterways at the time of modeling. The article considers the ways of improvement of rationing based on the automated ship control system suggested by the author, for the functioning of which there is additional standard equipment on board a ship. The system provides control of the main parameters of the engine and speed along sections of waterways and fuel consumption. The effectiveness of its functioning is shown. To increase the efficiency of rationing significantly, the necessary methodological, algorithmic and software developments are identified.*

*Keywords: rationing of vessels' running time and fuel consumption; improvement of rationing, sections of waterways, a model of optimizing running time, automated ship control system, effectiveness of the control system.*

### **References**

1. Platov A.YU., Platov YU.I. «Problemy vnedreniya analiticheskikh informacionnyh tekhnologij na rechnom transporte. Nauka i tekhnika transporta» Moskva, №3, 2010. S. 42–45.
2. Platov A.YU., Platov YU.I. «Problemy primeneniya sistem podderzhki prinyatiya reshenij na rechnom transporte. Rečnoj transport (XXI vek)». 2018. № 1 (85). S. 22–24.
3. R.A. Mundy, J.F. Campbell «Management Systems for Inland Waterway Traffic Control», Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, 2005.

4. J.L. Carroll, M.S. Bronzini «Simulation of Waterway Transport Systems», *Transportation Engineering Journal*, Vol. 97, No. 3, August 1971. P. 527–539.
5. D. Ronen «Cargo Ships Routing and Scheduling: Survey of Models and Problems», *European Journal of Operational Research*, 1983, No 12. P. 119–126.
6. Ronen, D. «Ship Scheduling: The Last Decade», *European Journal of Operational Research*, [28, 29, 30] 1993, No 71. P. 325–333.
7. Platov A.YU. «Metodologiya operativnogo planirovaniya raboty rechnogo gruzovogo flota v sovremennykh usloviyakh» dis. dok. tekhn. nauk: 05.22.19. N.Novgorod, 2010. 314 s.
8. Malyshkin A.G., Platov A.YU., Platov YU.I, Smirnov S.G. «Sistema avtomatizirovannogo rascheta norm vremeni sledovaniya i raskhoda topliva . Nauka i tekhnika na rechnom transporte» FGUP CBNTI Mintransa RF. M., 2003. S. 80–84.
9. Harilaos N. Psaraftis and Christos A. KontovasGreen. «Green Maritime Transportation: Speed and Route Optimization. Transportation Logistics The Quest for Win-Win Solutions» Springer International Publishing Switzerland, 2016. PP. 299–351.
10. Ronen D. «Effect of oil price on the optimal speed of ships» *Journal of the Operational Research Society*, 33 (11), 1982, pp. 1035–1040.
11. Barras B. «Ship design and performance for masters and mates» Oxford: Elsevier, 2004.
12. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. «Ship Resistance and Propulsion Practical Estimation of Ship Propulsive Power» Cambridge University Press, 2011.
13. Kowalski A. «Cost optimization of marine fuels consumption as important factor of control ship's sulfur and nitrogen oxides emissions» *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*, 2013, 36 (108) z. 1 pp. 94–99.
14. «Ekspluatatsionnye normativy dlya planirovaniya raboty transportnogo flota» ООО «Volgotanker» AMS, Moskva. 2003, 43 s
15. «Normy raskhoda topliva dlya planirovaniya raboty transportnogo flota» ООО «Volgotanker» AMS.Moskva. 2003, 71 s
16. Gruppy kompanij ELKOM. Web. 20 Apr. 2020 <<http://www.el-com.ru>>
17. Digital marine. Web. 10 Apr. 2020 <<http://www.digitalmarine.net>>
18. Ustavshchikov I.V. «Regulirovanie rezhima dvizheniya gruzovogo sudna na baze sistemy kontrol'ya usloviy ekspluatatsii» mag. dis. 23.04.01, N.Novgorod, 2018. 95 s.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОТ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Уставщиков Иван Викторович**, аспирант кафедры Управления транспортом, «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г.Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [Ustavshchikov@yarbunker.com](mailto:Ustavshchikov@yarbunker.com)

**Ivan V. Ustavshchikov**, postgraduate student of the Department of Transport Management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 06.05.2020 г.

## **Раздел III**

**Эксплуатация водного транспорта,  
судовождение  
и безопасность судоходства**

---

## **Section III**

***Operation of water transport, navigation  
and safety of navigation***



УДК 629.5.052

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.111>

## **АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ШВАРТОВКИ СУДОВ**

**А.В. Базылев**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**В.Я. Бычков**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**С.В. Перевезенцев**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

**В.И. Плющев**

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация. Актуальной проблемой нашего времени является реализация концепции безэкипажного судовождения. Проблема включает много аспектов, связанных с проектированием судов, созданием аппаратно-программной базы систем управления технологическими процессами судовождения, алгоритмического обеспечения этих систем, разработкой новых методов и средств измерения технологических параметров, средств навигации и связи и пр. Одной из самых сложных операций процесса судовождения является швартовка судна. В статье рассматриваются способы и средства измерения параметров технологического процесса швартовки судна нового типа с колесным движительно-рулевым комплексом. Обоснован состав средств измерения, выбрана аппаратная база для реализации автоматической швартовки. Предложена база для создания подсистемы автоматического управления процессом подхода судна к причальной стенке в составе компьютеризированной системы управления.*

*Ключевые слова: судно, безэкипажное судовождение, колесно-двигательный рулевой комплекс, автоматическая швартовка, средства измерения параметров движения судна.*

### **Введение**

В настоящее время во всём мире ведутся работы в области реализации концепции безэкипажного судовождения (БЭС). Ожидается, что реализация БЭС существенно повысит безопасность и эффективность судоходства за счёт снижения человеческого фактора, поскольку по различным оценкам 60-80% инцидентов на морском и речном транспорте связаны с ошибками членов экипажей. Реализация концепции БЭС требует решение комплекса проблем [1–4]:

- организации эффективного информационного обмена между судами, диспетчерскими пунктами, портами и другими структурами;
- обеспечения судов гидрографической, гидрологической и метеорологической информацией, информацией по безопасности в реальном времени;
- реализации надёжного навигационного обслуживания;
- создания интеллектуальных судовых систем и комплексов (управление судовыми энергетическими установками и двигателями, движением судна на заданной траектории, расхождение судов и т.д.) и ещё целого ряда подобных задач.

Одним из важных и труднореализуемых компонентов БЭС является операция швартовки. В настоящее время при выполнении операции швартовки судоводитель,

как правило, не обладает исчерпывающей информацией о параметрах технологического процесса (о положении судна относительно причальной стенки и других объектов, скорости сближения с причальной стенкой носовой и кормовой частей судна, скорости и направления ветра и течения и т.д.). Эта проблема чрезвычайно актуальна для пассажирских судов речного флота, осуществляющих швартовку к причалам речного типа несколько раз в сутки.

### Разработка и обоснование структуры

Цель данной статьи – разработка и обоснование структуры и базы для создания подсистемы автоматического управления процессом подхода судна к причальной стенке в составе компьютеризированной системы управления [5] пассажирского судна с колёсным движительно-рулевым комплексом (КДРК) «Золотое кольцо».

Судно «Золотое кольцо» имеет размеры  $81,6 \times 13,8 \times 9,5$  м, оснащено двумя гребными колёсами с независимыми частотно регулируемыми приводами [6] и носовым азимутальным подруливающим устройством. Движительный комплекс судна «Золотое кольцо» (два гребных колеса и азимутальное подруливающее устройство) позволяет реализовать безопасный подход к причалу. В тоже время, конструктивные особенности судна (малая осадка в 1,2 м и большая парусность) предопределяют сильную зависимость динамических свойств судна от ветрового воздействия [7]. Процесс швартовки можно разбить на следующие составляющие:

- выход судна по заданной траектории к причальной стенке (со снижением скорости до безопасных значений и компенсацией внешних воздействий);
- ориентация и стабилизация положения корпуса относительно причальной стенки;
- перемещение судна лагом к причалу.

Результаты компьютерного моделирования процесса подхода судна к причальной стенке подробно рассмотрены в [8,9,10].

Реализация алгоритмов управления процессом швартовки требует создания комплекса аппаратно-программных измерительных средств (КАПИС), обеспечивающих измерение ряда параметров для реализации безопасного режима сближения судна с причальной стенкой, а именно: координат, скоростей и ускорений, угловой скорости поворота судна, расстояния до причальной стенки и окружающих объектов, положения корпуса судна в пространстве, скорости и направления ветра.

Задача получения ряда параметров для функционирования КАПИС решается с помощью штатных приборов судна. Приемник ГЛОНАС/GPS позволяет получать координаты судна, курс и скорость движения, гироскоп – истинный курс судна. Для получения других параметров требуется создание новых измерительных средств.

Судовой КАПИС выполняется в виде распределённой системы, отдельные элементы которой расположены на больших расстояниях в различных точках судна. Датчики КАПИС должны работать автономно, производить не только измерения, но и предварительную обработку информации, позволять производить дистанционный контроль работоспособности и настройку параметров, обеспечивать простую интеграцию в информационную сеть судна.

Для реализации КАПИС была выбрана аппаратно-программная платформа Arduino [11–14]. Эта платформа имеет полностью открытую архитектуру, что позволяет легко менять и дополнять линейку модулей в зависимости от поставленной задачи. Открытый программный код Arduino, большое количество библиотек прикладных программ существенно сокращает время и повышает эффективность разработки программного обеспечения. Следует отметить и низкую стоимость модулей платформы Arduino.

Одной из важных функций КАПИС при выполнении швартовых операций является измерение расстояний до причальной стенки и окружающих объектов, скоростей

сближения с причальной стенкой носа и кормы судна, определения положение корпуса судна относительно причальной стенки.

Существуют различные виды измерителей расстояний до причальной стенки и окружающих объектов – ультразвуковые, радиотехнические (измерение времени распространения сигнала от передатчика до приёмника) [15–17], лазерные [18–19].

В известных системах SmartDock [20], MooRiNet [21], DAM [22] в качестве средств измерения расстояний используются лазерные дальномеры, устанавливаемые на причальных стенках. Они позволяют измерить расстояние от стенки до судна, угол подхода судна к швартовой стенке, скорость сближения. Информация отображается на мониторах и больших информационных табло, установленных на причале (рис. 1).



Рис. 1. Система SmartDock

Так же известны системы автоматического управления процессом швартовки для яхт. Система RaymarineDockSense [23] базируется на технологии машинного зрения, позволяющей распознавать окружающие объекты. В системе компании VolvoPenta [24] используется система датчиков, расположенных на причальной стенке.

Для речного флота оборудование всех причалов системами контроля процесса швартовки вряд ли возможно по экономическим причинам. Требуется создание автономной (устанавливаемой на судне) системы определения расстояния от судна до объектов и визуализации положения судна и окружающих объектов в пространстве.

Судно подводится к причальной стенке с использованием спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС/GPS) и системы дифференциальной коррекции (DGPS), в ближайшей зоне (порядка 100 м) сближение с причальной стенкой может осуществляться с использованием лазерной дальномерной системы, устанавливаемой непосредственно на судне.

Рассмотрим варианты размещения датчиков на судне. На автомобилях устанавливаются ультразвуковые датчики определения расстояния до препятствия. Они имеют широкую диаграмму направленности и определяют минимальное расстояние до препятствия в значительном секторе обзора. Особенность лазерного дальномера – очень узкая диаграмма направленности, а значит определение расстояния до объекта строго по лучу лазера. Это накладывает определенные требования на расположение лазерных дальномеров.

На рис. 2 представлены два варианта расположения судна относительно причальной стенки. В первом случае судно длиной  $L$  располагается параллельно причальной

стенке, во втором плоскость ДП повернута на угол  $\alpha$  (в обоих случаях центр судна расположен на расстоянии  $l_0$  от причальной стенки).

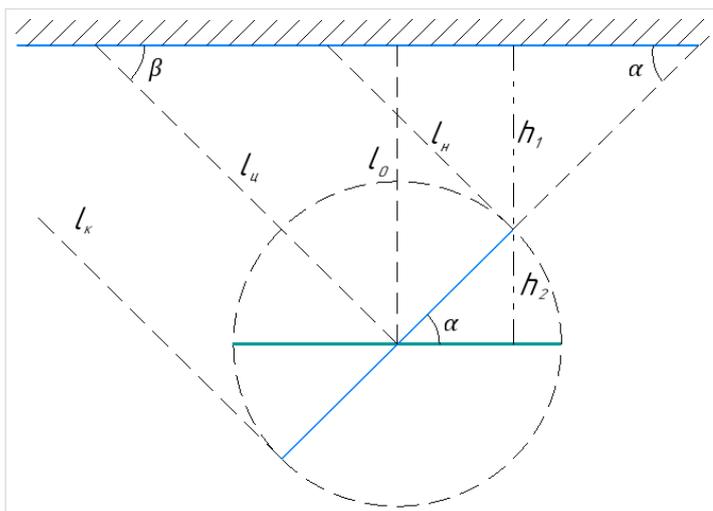


Рис. 2. Определение расстояния до причальной стенке с использованием лазерных дальномеров (лучи параллельны)

На рис. 2  $L$  – длина судна;  $l_n, l_c, l_k$  – расстояние до причальной стенки от носа, центра и кормы судна, измеренные лазерным дальномером;  $l_0$  – расстояние от центра судна до причала). Для рассматриваемой схемы можно записать

$$\begin{aligned} l_0 &= h_1 + h_2, \\ h_2 &= \frac{L}{2} * \sin \alpha, \\ h_1 &= l_0 - \frac{L}{2} * \sin \alpha, \\ \beta &= 90^\circ - \alpha. \end{aligned}$$

Измеряемое расстояние от носа судна до причальной стенки  $l_n$  составит

$$\begin{cases} l_n = l_0 \text{ для } \alpha = 0; \\ l_n = \frac{h_1}{\sin \beta} = \frac{l_0 - \frac{L}{2} * \sin \alpha}{\cos \beta} \text{ для } \alpha \neq 0. \end{cases}$$

Аналогично, измеряемые расстояния от центра судна  $l_c$  и от кормы судна  $l_k$  до причальной стенки можно записать как

$$\begin{cases} l_c = l_0 \text{ для } \alpha = 0; \\ l_c = \frac{l_0}{\cos \beta} \text{ для } \alpha \neq 0; \end{cases} \quad \begin{cases} l_k = l_0 \text{ для } \alpha = 0; \\ l_k = \frac{l_0 - \frac{L}{2} * \sin \alpha}{\cos \beta} \text{ для } \alpha \neq 0. \end{cases}$$

Таким образом, погрешности определения истинного расстояния от носа  $\Delta l_n$ , центра  $\Delta l_c$ , и кормы  $\Delta l_k$ , судна от причальной стенки с помощью лазерных дальномеров составляет:

$$\Delta l_n = \left( l_0 - \frac{L}{2} * \sin \alpha \right) * \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right);$$
$$\Delta l_c = l_0 * \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right);$$
$$\Delta l_k = \left( l_0 + \frac{L}{2} * \sin \alpha \right) * \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right).$$

Результаты расчётов для  $L = 100$  м и  $l_0 = 50$  м приведены на рис. 3. На рис. 4 приведён вариант отображения положения судна на экране системы позиционирования. На рис. 4 изображены реальные положения судов для  $\alpha = 20^\circ$  и  $\alpha = 40^\circ$ , и положение судов, построенное по результатам измерения лазерными дальномерами. Погрешности отображения положения судна для  $\alpha = 40^\circ$  составляет для носа около 7 м, для кормы 23 м. Такие погрешности недопустимы при эксплуатации судна.

Эти погрешности можно уменьшить при размещении датчиков на фиксированном расстоянии друг от друга и обеспечении строгой параллельности лазерных лучей. Однако при монтаже измерительных устройств в реальных условиях эти требования практически невыполнимы.

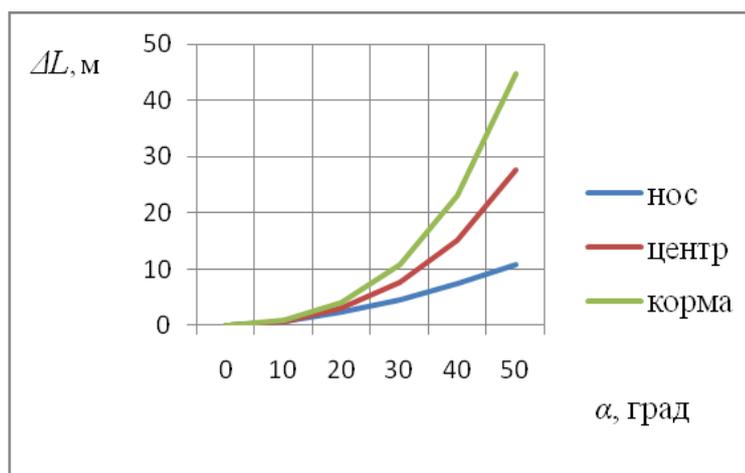


Рис. 3. Погрешности определения расстояния до причальной стенки с использованием лазерных дальномеров в зависимости от угла поворота ДП судна

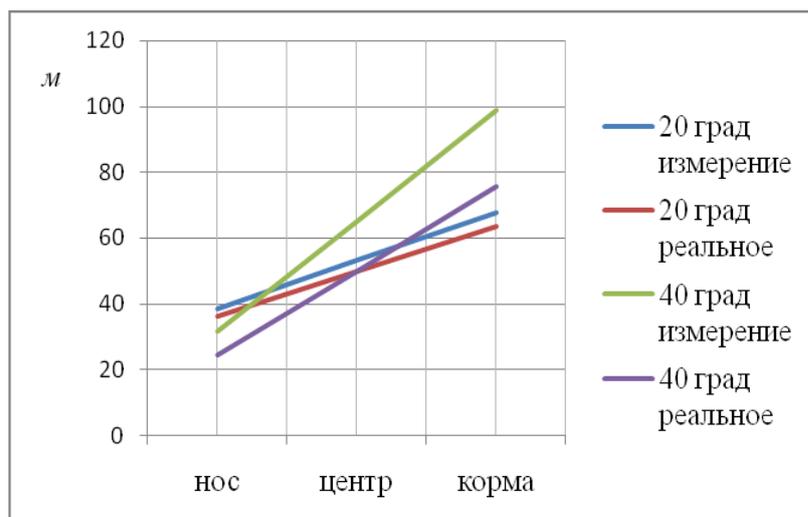


Рис. 4. Отображение положения судна на экране системы позиционирования

Эту проблему можно решить, устанавливая датчики попарно с фиксированным углом между лучами (рис. 5).

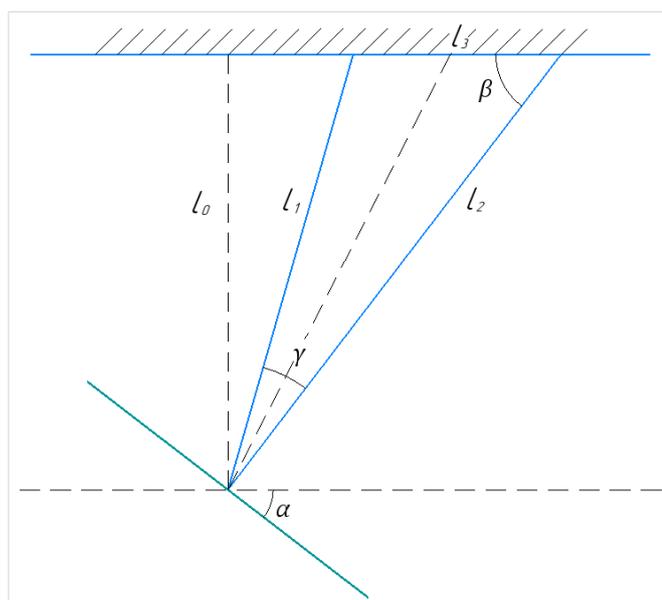


Рис. 5. Установка пары датчиков с фиксированным углом  $\gamma$  между лучами.

В этом случае

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos \gamma},$$

где  $l_1, l_2$  – расстояние до причальной стенки, измеренное лазерными дальномерами;  
 $\gamma$  – угол между лучами (задаётся при изготовлении измерительного устройства).

Поскольку

$$\frac{l_1}{\sin \beta} = \frac{l_3}{\sin \alpha},$$
$$\sin \beta = \frac{l_1}{l_3} \sin \alpha,$$

расстояние до причала можно вычислить следующим образом:

$$l_0 = l_2 * \sin \beta = \frac{l_1 l_2}{l_3} \sin \alpha.$$

Для обеспечения «кругового» обзора измерительные узлы устанавливаются по периметру судна, что позволяет получить исчерпывающую картину о положении причальной стенки и окружающих объектах.

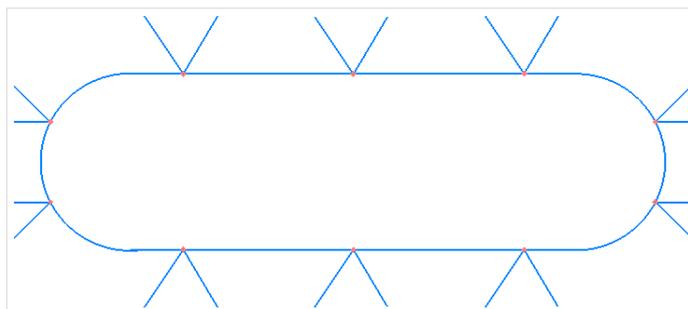


Рис. 6. Расположение лазерных дальномеров

Измеряя расстояние от носа и кормы до причальной стенки можно вычислить такие важные параметры, как скорости сближения носовой и кормовой частей судна с причальной стенкой, а также отобразить на экране положение причальной стенки и других объектов относительно судна.

В состав измерительных модулей входит лазерный дальномер, микроконтроллер Arduino, интерфейс RS485. Модуль обеспечивает измерение расстояния в пределах 0–100 м с погрешностью  $\pm 5$  мм с временем 0,1–4 с при температурах от  $-10$  °С до  $+ 40$  °С.

Были проведены натурные испытания макета измерителя расстояний на базе датчика 328ft, в ходе которых проверены заявленные характеристики лазерного дальномера. Точность измерения расстояния не зависит от освещённости и цвета отражающей поверхности. Полученная зависимость  $\Delta$  погрешности измерений от расстояния представлена на рис. 7.

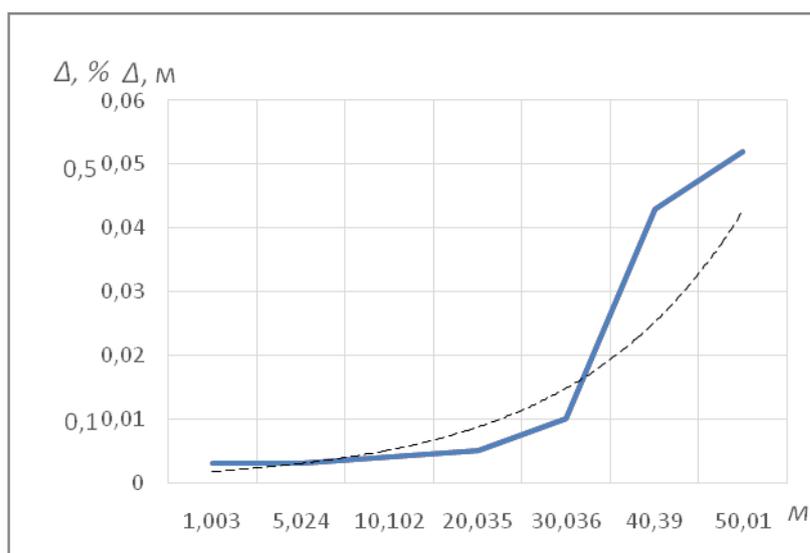


Рис. 7. Зависимость  $\Delta$  погрешности измерений от расстояния

В таблице приведены результаты измерений предельной дальности измерений в зависимости от материала и фактуры поверхности.

Таблица 1

**Зависимость предельной дальности измерений от материала поверхности**

Материал поверхности	Предельная дальность измерений лазерного дальномера 328ft, м
Бетонная стена	100
Кирпичная стена	100
Металлическая дверь, окрашенная глянцевой краской	96
Металлическая дверь, окрашенная матовой краской	71
Гладкая деревянная дверь	92
Дерево со сглаженным рельефом коры	58
Дерево с характерно выраженным рельефом коры	43

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования такого измерительного модуля при выполнении швартовых операций.

Для получения значений скоростей и ускорений корпуса судна может быть использован комплексный датчик, включающий в свой состав акселерометр (измерение линейных ускорений) и гироскоп (измерения угловых скоростей). Комплексный датчик имеет программируемую функцию фильтрации полученных данных от случайных погрешностей. Программная обработка позволяет получить линейную скорость судна, линейное ускорение и угловые ускорения необходимые для реализации КАПИС.

Основной сложностью при работе с комплексными датчиками акселерометр /гироскоп является их высокая чувствительность. Однако, вычислительные возможности аппаратной базы Arduino позволяют программно обрабатывать информацию и искусственно занижать чувствительность, а также проводить калибровку для устранения статической погрешности. Датчик WT901В имеет следующие параметры:

- диапазон измерений ускорения  $\pm 2/4/8/16G$ ;
- диапазон измерения углов  $\pm 250/500/1000/2000^\circ$ ;
- стабильность измерения ускорения  $0,01 g$ , угловой скорости  $0,05^\circ / c$ ;

- точность измерений по оси X и Y – динамическая 0,1 °, статическая 0,05°;
- рабочее напряжение питания 3,3В ~ 5В;
- поддержка последовательного порта и интерфейса I2C (скорость последовательного порта от 2400 бит до 921600 бит).

Значения скоростей и ускорений, полученных с модуля акселерометр/гироскоп, позволяет определить положение корпуса в пространстве. Такой метод требует постоянных расчетов и контроля параметров, а также установки начального положения судна, от которого будет считаться смещение. Постоянно накапливающаяся ошибка при подобных расчетах не позволяет применять такой метод на больших временных промежутках. Однако, постоянный мониторинг положения судна с помощью приемников ГЛОНАСС/GPS позволяет корректировать расчеты.

Наряду со штатным судовым приемником ГЛОНАСС/GPS предполагается установка двух дополнительных приемников (из платформы Arduino) на носу и корме судна. Модули обеспечивают работу с 3–4 спутниковыми навигационными системами (ГЛОНАСС, GPS, а также Galileo и Beidou). Использование нескольких навигационных систем обеспечивает хорошую зону покрытия спутниками в любом месте земного шара и обеспечивает достаточную точность местоопределения не только на открытом пространстве, но и при наличии препятствий (мосты, высокий берег, линии электропередач и т.п.).

Технические характеристики дополнительных приёмников:

- чип u-blox7020;
- тип приёмника GPS и QZSS: L1 C/A, 1575,42 МГц, L1OF, 1598,0625 ~ 1605,375 МГц, SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS;
- точность позиционирования 2 м;
- время горячего старта – 1,5 с, холодного – 36 с;
- чувствительность -148dBm ~ -167dBm;
- скорость обновления до 10 Гц (GPS и ГЛОНАСС или GPS и Beidou);
- поддержка протокола NMEA 0183 v2.3 и V4.x;
- скорость передачи данных 9600 – 115200 бит.

Комплексная обработка данных акселерометра/гороскопа и навигационных модулей позволит надежно контролировать положение корпуса и перемещения судна в зоне выполнения швартовых операций.

Как отмечалось выше, существенно на процесс маневрирования судна влияет ветер. Скорость и направление ветра измеряются анемометром и флюгером с цифровым выходом. Датчики (анемометр SY-FS1 и флюгер SY-FX1) имеют следующие характеристики:

- напряжение питания 5В;
- энергопотребление 4–20 мА;
- интерфейс передачи данных RS485;
- диапазон измерения флюгера 0–360°;
- диапазон измерения анемометра 0–30 м/с.

### **Заключение**

Предложенный состав измерительных модулей позволяет создать аппаратно-программный комплекс для автоматизации сложной технологической операции – швартовки судна.

### **Список литературы:**

1. Borge Rokseth, Odd Ivar Haugen, Ingrid Bouwer Utne. Safety Verification for Autonomous Ships – MATEC Web Conf. 273 02002 (2019).
2. Felski, A.; Zwolak, K. The Ocean-Going Autonomous Ship—Challenges and Threats – Journal of Marine Science and Engineering 2020, 8, 41.

3. Krzysztof Wróbel, JakubMontewka, Pentti Kujala. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety. Reliability Engineering & System Safety Volume 165, September 2017, Pages 155–169
4. Ahvenjärvi S. The Human Element and Autonomous Ships. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 3, pp. 517-521, 2016
5. Плющаев В.И., Галкин Д.Н., Итальянцев С.А. Компьютеризованная система управления пассажирским колесным теплоходом – Речной транспорт (XXI век). 2014. – № 6 (71), с. 35–37.
6. Пат. № 2225327 Российская Федерация, МПК В63Н1/04, В63Н05/03. Колесный движительно-рулевой комплекс/ Фальмонов Е.В.; заявитель и патентообладатель Фальмонов Евгений Васильевич. № 2001132474/11; заявл. 30.11.2001; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 7., 11 с
7. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В.И. Динамика судна с колесным движительно-рулевым комплексом в условиях внешних воздействий.- Морские интеллектуальные технологии. 2019. – №4 (46), т.2, с. 139–146.
8. Грошева Л.С., Плющаев В.И., Управление судном с колесным движительно-рулевым комплексом при выполнении швартовых операций.– Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2017. – №4, с. 21–30.
9. Плющаев В.И., Кузьмичев И.К. Пути реализации автоматической швартовки судна в рамках создания технологии безэкипажного судовождения. – Морские интеллектуальные технологии.2018. – 4(42), т.2, с. 98–103.
10. Грошева Л.С., Мерзляков В.И., Плющаев В.И. Швартовка судна с колесным движительно-рулевым комплексом. – Морские интеллектуальные технологии.2019.– 3(45), т.3, с. 191–195.
11. Getting started with Arduino. Режим доступа: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
12. Z Gingl, J Mellár, T Szépe, G Makan, R Mingesz, G Vadai and K Kopasz. Universal Arduino-based experimenting system to support teaching of natural sciences – Journal of Physics: Conference Series, Volume 1287, GIREP-MPTL 2018 9–13 July 2018, San Sebastian, Spain
13. Haniszewski, T. Conception of the Arduino platform as a base for the construction of distributed diagnostic systems. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2016, 93, 31-40.
14. Бычков В.Я., Гордяскина Т.В., Рубцов А.В., Перевезенцев С.В. О первом опыте создания интеллектуальных датчиков для реализации системы управления судном. // Великие реки 2018: Материалы международной научно-методической конференции. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». –2018. – Режим доступа: <http://вф-река-море.рф/2018/PDF/68.pdf>
15. Swarm ProductFamily. Режим доступа: [https://nanotron.com/EN/pr\\_protect-php](https://nanotron.com/EN/pr_protect-php)
16. Ultrasonic sensor AFEs. Режим доступа: <https://www.ti.com/sensors/specialty-sensors/ultrasonic/overview.html>
17. Лебедева С.В., Мерзляков В.И. «Автоматизация процесса измерения расстояний между объектами в системах швартовки судов» Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2018. № 56. С. 49–55.
18. First Sensor. Optical sensors. Режим доступа: <https://www.first-sensor.com/en/product-search/search-by-specs/index.html>
19. Laser rangefinders for mobile and stationary systems. Режим доступа: <https://www.jenoptik.com/products/lidar-sensors-technologies/laser-rangefinders>
20. Laser docking aid system SmartDock. Режим доступа: <https://www.trelleborg.com/en/marine-and-infrastructure/products--solutions--and--services/marine/docking--and--mooring/docking--aid--system/smart--dock--laser>
21. Система мониторинга ишвартовки и стоянки судов MOORiNET. Режим доступа: <http://moorinet.ru/>
22. Harbour equipment and machinery prosertek. Режим доступа: <https://prosertek.com/>
23. Docksense control – assisted docking technology. Режим доступа: <https://www.raymarine.com/assisted-docking/docksense-control.html>
24. Volvo penta unveils pioneering self-docking yacht technology. Режим доступа: <https://www.volvopenta.com/marineleisure/en-en/news/2018/jun/volvo-penta-unveils-pioneering-self-docking-yacht-technology.html>

## HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR AUTOMATIC MOORING

**Alexander V. Bazylev**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Vladislav Y. Bychkov**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Sergei V. Perevezentsev**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Valeri I. Plyushchaev**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. Nowadays the implementation of the concept of crew-free navigation is considered to be the urgent problem. It comprises many aspects related to the design of vessels, the creation of hardware and software base of navigation process control systems, algorithmic support for these systems, the development of new methods and means of measuring technological parameters, navigation and communication tools and so on. One of the most difficult procedures of the navigation process is mooring of the vessel. The article deals with the methods and means of measuring the parameters of the technological process of mooring the new type of vessel with a wheel propulsion and steering complex. Composition of the measuring instruments is established and the hardware base for implementing automatic mooring is selected. The base for creating a subsystem for automatic control of the ship's approach to the berth wall as a part of a computerized control system is proposed.*

*Keywords: vessel, non-crew navigation, wheel-driven steering system, automatic mooring, means of measuring vessel movement parameters.*

**References**

1. Borge Rokseth, Odd Ivar Haugen, Ingrid Bouwer Utne. Safety Verification for Autonomous Ships – MATEC Web Conf. 273 02002 (2019).
2. Felski, A.; Zwolak, K. The Ocean-Going Autonomous Ship—Challenges and Threats – Journal of Marine Science and Engineering 2020, 8, 41.
3. Krzysztof Wróbel, JakubMontewka, Pentti Kujala. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety. Reliability Engineering & System Safety Volume 165, September 2017, Pages 155-169
4. Ahvenjärvi S. The Human Element and Autonomous Ships. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 3, pp. 517-521, 2016
5. Computer-aided control system of passenger wheeled ship / V. Plyuschaev, D. Galkin, S. Italyantsev // River transport (XXIst century).2014 – № 6 (71). – p. 35-37
6. Fal'mov E. V. Kolesnyi dvizhitel'no-rulevoi kompleks [Wheeled propulsion steering complex]. Patent RF, no. 2225327, 10.03.2004.
7. Vladislav Y. Bychkov, Lyudmila S. Grosheva, Valeriy I. Plyushchaev Dynamics of vessel with wheel propulsion steering system under external conditions /Marine intellectual technologies № 4 T.2, 2019/№ 4 V.2, 2019
8. Grosheva L., Plyushchayev V. Handling a ship with wheeled propulsion-steering complex while performing mooring operations // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies . 2017. №. 4. pp. 21-30.
9. Valery I. Plyushchaev, Igor K. Kuzmichev Ways of the ship automatic mooring implementation within the framework of free shipping technology creation/Marine intellectual technologies 2018. – 4(42), т.2, с. 98-103.
10. Lyudmila S. Grosheva, Vladimir I. Merzlyakov, Valeriy I. Plyushchaev Mooring of a ship with wheel propulsion steering complex/Marine intellectual technologies 2019.– 3(45), т.3, с. 191-195.
11. Getting started with Arduino -Web: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
12. Z Gingl, J Mellár, T Szépe, G Mának, R Mingesz, G Vadai and K Kopasz. Universal Arduino-based experimenting system to support teaching of natural sciences – Journal of Physics: Conference Series, Volume 1287, GIREP-MPTL 2018 9–13 July 2018, San Sebastian, Spain
13. Haniszewski, T. Conception of the Arduino platform as a base for the construction of distributed diagnostic systems. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2016, 93, 31-40.

14. V.Y. Bychkov, A.V. Rubtsov, T.V. Gordyaskina, S.V. Perevezentsev. About the first experience of creation of intelligent sensors for system implementation ship management –2018. – Web: <http://вф-пека-море.пф/2018/PDF/68.pdf>
15. Swarm ProductFamily. – Web: [https://nanotron.com/EN/pr\\_protect-php](https://nanotron.com/EN/pr_protect-php)
16. Ultrasonic sensor AFEs. – Web: <https://www.ti.com/sensors/specialty-sensors/ultrasonic/overview.html>
17. Lebedeva S.V., Merzlyakov V.I. Automation of distance measurement between objects in ship mooring systems/Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport 2018. № 56. С. 49–55.
18. First Sensor. Optical sensors. – Web: <https://www.first-sensor.com/en/product-search/search-by-specs/index.html>
19. Laser rangefinders for mobile and stationary systems. – Web: <https://www.jenoptik.com/products/lidar-sensors-technologies/laser-rangefinders>
20. Laser docking aid system SmartDock. – Web: <https://www.trelleborg.com/en/marine-and-infrastructure/products--solutions--and--services/marine/docking--and--mooring/docking--aid--system/smart--dock--laser>
21. Mooring and vessel berth monitoring sistem MOORiNET. – Web: <http://moorinet.ru/>
22. Harbour equipment and machinery prosertek. – Web: <https://prosertek.com/>
23. Docksense control – assisted docking technology. – Web: <https://www.raymarine.com/assisted-docking/docksense-control.html>
24. Volvo penta unveils pioneering self-docking yacht technology. – Web: <https://www.volvopenta.com/marineleisure/en-en/news/2018/jun/volvo-penta-unveils-pioneering-self-docking-yacht-technology.html>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Базылев Александр Владимирович**, инженер кафедры радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: [kaf\\_radio@vsuwt.ru](mailto:kaf_radio@vsuwt.ru)

**Бычков Владислав Ярославич**, аспирант кафедры радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: [kaf\\_radio@vsuwt.ru](mailto:kaf_radio@vsuwt.ru)

**Перевезенцев Сергей Владимирович**, к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: [kaf\\_radio@vsuwt.ru](mailto:kaf_radio@vsuwt.ru)

**Плющаев Валерий Иванович**, проф., заведующий кафедрой радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: [kaf\\_radio@vsuwt.ru](mailto:kaf_radio@vsuwt.ru)

**Alexander V. Bazylev**, Engineer of the Department of Radio Electronics Volga state University of water transport  
5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Vladislav Y. Bychkov**, PhD student of the Department of Radio Electronics Volga state University of water transport  
5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Sergei V. Perevezentsev**, PhD in Engineering Science, Associate Professor, associate Professor of the Department of Radio Electronics Volga state University of water transport  
5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Valeri I. Plyushchaev**, Professor, Dr.Sci.Tech., Professor of the Department of Radio Electronics Volga state University of water transport  
5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 28.05.2020 г.

УДК 656.62.052

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.112>

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАНЕВРА СУДНА «РАЗВОРОТ НА МЕСТЕ»

П.Н. Токарев

Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия

*Аннотация. Судоводитель должен хорошо знать маневренные качества своего судна, а также возможности судовых средств управления для выполнения того или иного маневра. В «Информации» о параметрах поворотливости, которая имеется на судне, нет данных о выполнении такого важного маневра, как «разворот на месте», который часто используется на стесненной по габаритам акватории. В работе, приняв некоторые допущения, приведено решение системы уравнений движения судна применительно к рассматриваемому маневру. Автором получены аналитические выражения для расчета угловой скорости вращения и угла разворота судна по времени маневра «разгона», вращение по инерции и активного гашения инерции вращения. Используя полученные выражения, выполнен расчет параметров оборота теплохода проекта 507.*

*Приведены графики зависимости угловой скорости и угла поворота судна от времени маневра.*

*Ключевые слова: двухвинтовое судно, работа движителей «враздрай», носовое подруливающее устройство, стесненная акватория, разворот «на месте», расчет параметров.*

В практике судовождения довольно часто возникает необходимость выполнения маневров при скоростях хода, близких к нулю. Это происходит при маневрировании судов на акваториях ограниченных размеров (постановка судна на якорь и снятие с якоря, привально-отвальные маневры в порту). В этом случае практический интерес для судоводителей представляет знание возможностей судовых средств управления своего судна для выполнения таких видов маневра, как движение судна лагом и вращение «на месте».

Рассмотрим маневр судна «разворот на месте». Принимаем допущение о том, что судно не имеет крена и дифферента, и пренебрегаем асимметрией судна относительно поперечной вертикальной плоскости, проходящей через начало системы координат, связанной с судном. Аналитические выражения для определения параметров выполнения оборота на месте, когда радиус циркуляции центра масс судна стремится к нулю ( $R_{ЦМ} \rightarrow 0$ ) найдем из решения системы уравнений (35) [1].

Полагая, что продольного и поперечного смещения судна нет ( $\frac{dv_x}{dt} = \frac{dv_y}{dt} = 0$ ), вращение судна «на месте» с учетом схемы действия усилий на судно (рис.1.) может быть описано следующей системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} T_{E1} - T_{E2} &= 0; \\ Y_Y + Y_R &= 0; \\ J_z (1 + k_{66}) \frac{d\omega}{dt} &= M_R + M_F + M_P - M_G. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $T_{E1}$  и  $T_{E2}$  – полезный упор движителей на передний и задний ход соответственно;

$Y_Y$  и  $Y_R$  – боковая составляющая гидродинамической силы на корпусе судна и руле-  
вом органе соответственно;

$M_R$ ,  $M_F$ ,  $M_P$  и  $M_G$  – момент, создаваемый рулевым устройством, подруливающим  
устройством, работой движителей «враздрай» и гидродинамический момент на  
корпусе судна соответственно;

$J_z$  – момент инерции судна относительно вертикальной оси, проходящей через центр  
масс судна.

Выражения для определения момента инерции  $J_z$  предложены В.Г. Павленко [2],  
Р.Я. Першицем [3], Н.Ф. Сторожевым [4]. При расчетах маневренных качеств речных  
судов обычно используются формулы Н.Ф. Сторожева или В.Г. Павленко.

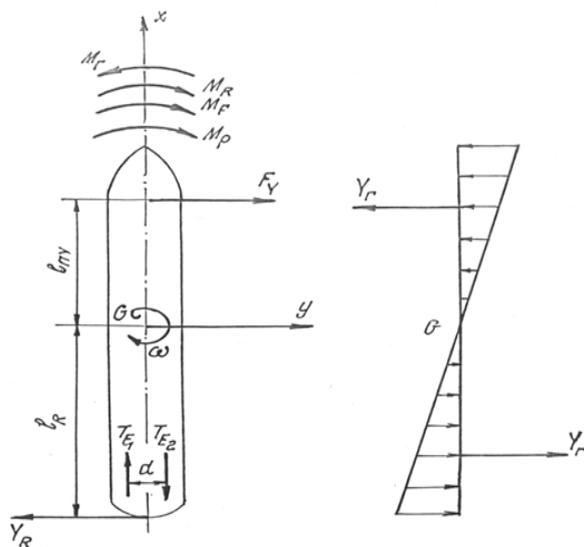


Рис. 1. Схема сил и моментов, действующих на судно  
при выполнении оборота «на месте»

Гидродинамический момент на корпусе судна  $M_G$  по исследованиям Р.Я. Пер-  
шица [3] определяется по выражению:

$$M_G = 0,059 c_2 \frac{\rho}{2} L^4 T \omega^2 . \quad (2)$$

По исследованиям Г.В. Соболева [5]:

$$M_G = 0,067 c_2 \frac{\rho}{2} L^4 T \omega^2 . \quad (3)$$

где  $L$  – длина судна;  
 $T$  – осадка судна.

Условия равенства  $v_x = v_y = 0$  можно определить из решения первого и второго  
уравнений системы при заданной частоте вращения движителя, работающего на пе-  
редний или задний ход по выражениям, предложенным в работе [6].

Зависимости вида  $\Theta = f(t)$ ,  $\omega = f(t)$ ,  $\omega = f(\Theta)$  для эволюционного периода  
вращения «на месте» получим из решения третьего уравнения системы (1), которое  
можно привести к следующему виду:

$$\frac{d\omega}{dt} = B - A\omega^2, \quad (4)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются из выражений:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{c_{M_{BP}} L^4 T}{2J_z (1 + k_{66})}; \\ B &= \frac{M_R + M_F + M_P}{J_z (1 + k_{66})}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

После разделения переменных в уравнении (4) и интегрирования имеем

$$t = \frac{1}{2AE} \ln \left| \frac{E + \omega}{E - \omega} \right|, \quad (6)$$

где  $E = \sqrt{B/A}$  – скорость вращения судна в установившемся режиме.

Выражение (6) позволяет получить зависимость  $\omega = f(t)$

$$\omega = E \frac{e^{2AEt} - 1}{1 + e^{2AEt}}. \quad (7)$$

Учитывая, что  $\omega = d\Theta/dt$ , зависимость угла поворота судна от времени определим из интегрирования выражения (7).

После интегрирования имеем

$$\Theta = \frac{1}{2A} \left[ \ln \frac{(1 + e^{2AEt})^2}{e^{2AEt}} - 1,386 \right]. \quad (8)$$

В некоторых случаях необходимо знать значение угла поворота от угловой скорости вращения  $\omega$ . Для этого запишем следующее соотношение:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\Theta} \cdot \frac{d\Theta}{dt} = \omega \frac{d\omega}{d\Theta}. \quad (9)$$

Тогда

$$\Theta = \int_0^{\omega} \frac{\omega d\omega}{B - A\omega^2}. \quad (10)$$

После интегрирования выражения (10) и некоторых преобразований, получим

$$\Theta = \frac{1}{2A} \ln \left| \frac{E^2}{E^2 - \omega^2} \right|, \quad (11)$$

или

$$\omega = E \sqrt{1 - \frac{1}{e^{2A\Theta}}}. \quad (12)$$

Для определения параметров разгона до установившегося значения используем выражение (4), принимая  $d\omega/dt = 0$ , тогда

$$B - A\omega_0^2 = 0. \quad (13)$$

откуда

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{B}{A}} = E. \quad (14)$$

Подставляя выражение (14) в формулу (7), находим, что

$$\frac{e^{2AEt} - 1}{1 + e^{2AEt}} = 1. \quad (15)$$

Соотношение (15) равно единице при  $t \rightarrow \infty$ . Для практических расчетов обычно принимают:

$$\omega_0 = 0,95E. \quad (16)$$

Подставляя выражение (16) в формулу (7), имеем:

$$t_{раз} = \frac{1,83}{AE}. \quad (17)$$

Угол, на который повернется судно до установившегося значения угловой скорости, определяем из выражения (8) с учетом (17)

$$\Theta = \frac{1,165}{A}. \quad (18)$$

Используя полученные зависимости (7), (8) и (12), выполнен расчет  $\omega = f(t)$ ,  $\Theta = f(t)$  и  $\omega = f(\Theta)$  для теплохода пр. 507 в полном грузу. Результаты расчета приведены на рис. 2.

Расчет произведен для случая, соответствующего работе двигателей «враздрай» полным ходом и перекладки насадок «внутри». При любом другом режиме работы двигателей, а также в случае перекладки насадок «наружу» угловая скорость вращения уменьшится и потребуются больший промежуток времени для поворота на заданный угол.

Выражения для определения параметров вращения по инерции определяется из решения уравнения

$$\frac{d\omega}{dt} = -A\omega^2. \quad (19)$$

Зависимости  $\omega = f(t)$ ,  $\Theta = f(t)$  и  $\omega = f(\Theta)$  получены в следующем виде:

$$\omega = \frac{\omega_1}{1 + A\omega_1 t}. \quad (20)$$

$$\Theta = \frac{1}{A} \ln |1 + A\omega_1 t|. \quad (21)$$

$$\Theta = \frac{1}{A} \ln \left| \frac{\omega_1}{\omega} \right|. \quad (22)$$

В выражениях (20–22)  $\omega_1$  – угловая скорость вращения судна в момент остановки работы ПУ и движителей.

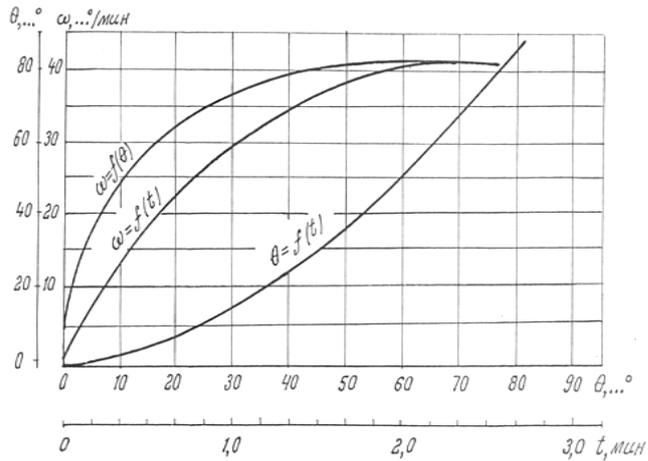


Рис. 2. Зависимость  $\omega$  и  $\Theta$  от времени маневра

Результаты расчетов  $\Theta = f(t)$  и  $\omega = f(\Theta)$  для предыдущего примера при  $\omega_1 = \omega_0$  приведены на рис. 3.

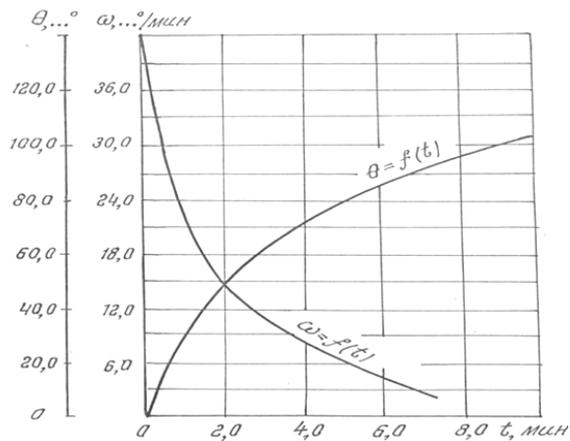


Рис. 3. Изменение  $\omega$  и  $\Theta$  при вращении судна по инерции

В случае активного гашения инерции вращения судна, зависимости  $\Theta = f(t)$  и  $\omega = f(t)$  находим из решения уравнения вида:

$$\frac{d\omega}{dt} = -B - A\omega^2. \quad (23)$$

Интегрирование уравнения (23) позволяет получить

$$t = \frac{1}{\sqrt{AB}} \left( \operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\sqrt{B/A}} \right), \quad (24)$$

из выражения (24)

$$\omega = \sqrt{\frac{B}{A}} \operatorname{tg} \left( \operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}} - \sqrt{AB} t \right). \quad (25)$$

Если учесть, что  $d\Theta/dt = \omega$  и проинтегрировать выражение (25) по времени, можно получить зависимость  $\Theta = f(t)$  вида

$$\Theta = \frac{1}{A} \ln \frac{\cos(\operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}} - \sqrt{AB}t)}{\cos(\operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}})}. \quad (26)$$

В формулах (24–26)  $\omega_2$  – угловая скорость вращения судна на момент начала активного гашения инерции вращения.

Для определения зависимости  $\Theta = f(t)$ , воспользуемся выражением (9), тогда

$$\Theta = -\frac{1}{A} \int_{\omega_2}^0 \frac{\omega d\omega}{[(\sqrt{B/A})^2 + \omega^2]}. \quad (27)$$

После интегрирования (26) и некоторых преобразований имеем

$$\Theta = \frac{1}{2A} \ln \left| 1 + \left( \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}} \right)^2 \right|. \quad (28)$$

Для определения времени активного гашения инерции вращения до  $\omega = 0$  необходимо проинтегрировать выражение (23) с пределами  $(\omega_2; 0)$ , тогда

$$t = \frac{1}{\sqrt{AB}} \operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}}. \quad (29)$$

Результаты расчетов  $\Theta = f(t)$  и  $\omega = f(\Theta)$  для теплохода пр. 507 в полном грузу с установившейся скорости вращения  $\omega_0$  при таком же режиме работы движителей, что и для случая разгона представлены на рис. 4.

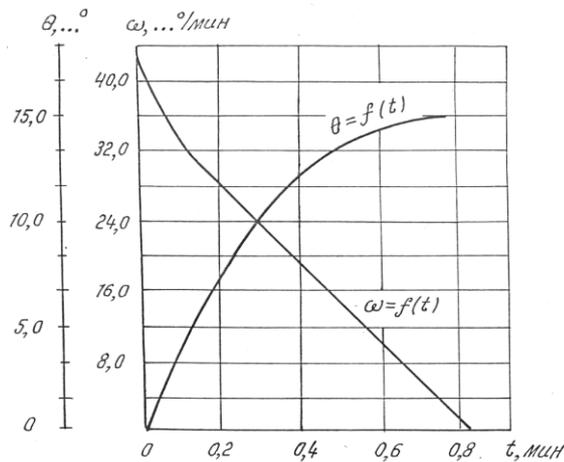


Рис. 4. Изменение  $\omega$  и  $\Theta$  при активном гашении инерции вращения

Таким образом, выражения, приведенные в статье, позволяют выполнять расчет параметров маневрирования судна при скоростях движения судна, близких к нулю, при использовании всего комплекса средств управления. Информация об угловой

скорости вращения и угла поворота судна по времени маневра будет полезна судоводителям и дополнит «Информации о параметрах поворотливости судна».

**Список литературы:**

1. Токарев П.Н. Математическая модель произвольного движения и маневрирования судна / П.Н. Токарев // Н.Новгород. Вестник ВГАВТ. – 2017. – №56. – С. 198–214.
2. Павленко В.Г. Маневренные качества речных судов (Управляемость судов и составов) / В.Г. Павленко. – Москва: Транспорт, 1979. – 184 с.
3. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля/ Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов – Ленинград: Судостроение, 1973. – 512 с.
4. Сторожев Н.Ф. К расчету момента инерции судна относительно вертикальной оси / Н.Ф. Сторожев // Новосибирск.Тр. Новосиб. ин-та инж. водн. трансп. (НИИВТ). – 1960. – Вып.5. – С. 64–67.
5. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения / Г.В.Соболев. – Ленинград: Судостроение, 1976. – 478 с.
6. Лебедев Э.П. Средства активного управления судами / Э.П. Лебедев – Ленинград.: Судостроение, 1969. – 264 с.
7. Ходкость и управляемость судов: учебник / утв. Управл. кадров и учеб. заведений МРФ РСФСР для студ. ин-тов водн. тр-та; под ред. В.Г. Павленко. – Москва: Транспорт, 1991. – 455 с.
8. Гофман А.Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна / А.Д. Гофман. – Ленинград: Судостроение, 1988. – 360 с.
9. Сандлер Л.Б. Взаимодействие судового руля со струей гребного винта в швартовном режиме /Л.Б. Сандлер //Совершенствование гидродинамических качеств судов и составов на внутренних водных путях. – Новосибирск, 1986. – С. 75–80.
10. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном / Р.Я. Першиц. – Ленинград: Судостроение, 1983. – 272 с.
11. Токарев П.Н. Оценка условий безопасного маневрирования при ветре на малых скоростях хода / П.Н. Токарев // Н.Новгород. Вестник ВГАВТ. – 2019. – №60. – С. 202–212.

## **ANALYTICAL CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE MANEUVER OF THE SHIP «U-TURN IN PLACE»**

**Pavel N. Tokarev**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The skipper must be well aware of the maneuverability of his vessel, as well as the capabilities of the ship's controls to perform a particular maneuver. In the «Information about the parameters of turnability, which is available on the ship, there is no data on the performance of such an important maneuver as «turn in place», which is often used in a confined area of water. Some assumptions have been taken in this article and the solution of the system of equations of the motion of the vessel in relation to the considered maneuver is proposed. The author obtained analytical expressions for calculation of angular speed and the angle of turn of the vessel at the time of the maneuver of «acceleration», the rotation by inertia and active damping rotational inertia. Using the obtained expressions, the calculation of the parameters of the turnover of the project 507 ship was performed. Graphs of the dependence of the angular speed and the angle of rotation of the vessel on the maneuver time are given.*

*Keywords: twin screw vessel, the propellers «vrazdrai», bow thruster, confined water area, turn «in place», calculation of the parameters.*

**References:**

1. Tokarev P.N. Matematicheskaya model' proizvol'nogo dvizheniya i manevrirovaniya sudna / P.N.Tokarev // N.Novgorod. Vestnik VGAVT. – 2017. – №56. – С. 198–214.

2. Pavlenko V.G. Manevrennye kachestva rechnyh sudov (Upravlyaemost' sudov i sostavov) / V.G. Pavlenko. – Moskva: Transport, 1979. – 184 s.
3. Vojtkunskij YA.I. Spravochnik po teorii korablya/ YA.I.Vojtkunskij, R.YA.Pershic, I.A.Titov – Leningrad: Sudostroenie, 1973. – 512s.
4. Storozhev N.F. K raschetu momenta inercii sudna odnositel'no vertikal'noj osi/N.F.Storozhev // Novosibirsk. Tr. Novosib. in – ta inzh. vodn. transp. (NIIVT). – 1960. – Vyp.5. – S.64 – 67.
5. Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizaciya sudovozhdeniya/G.V.Sobolev. – Leningrad: Sudostroenie, 1976. – 478s.
6. Lebedev E.P. Sredstva aktivnogo upravleniya sudami/E.P.Lebedev – Leningrad.: Sudostroenie, 1969. – 264 s.
7. Hodkost' i upravlyaemost' sudov: uchebnik / utv. Upravl. kadrov i ucheb. zavedenij MRF RSFSR dlya stud. in-tov vodn. tr-ta; pod red. V.G. Pavlenko. – Moskva: Transport, 1991. – 455 s.
8. Gofman A.D. Dvizhitel'no – rulevoj kompleks i manevrirovaniye sudna / A.D.Gofman. – Leningrad: Sudostroenie, 1988. – 360 s.
9. Sandler L.B. Vzaimodejstvie sudovogo rulya so struej grebnogo vinta v shvartovnom rezhime L.B. Sandler //Sovershenstvovanie gidrodinamicheskikh kachestv sudov i sostavov na vnutrennih vodnyh putyah. – Novosibirsk, 1986. – S. 75–80.
10. Pershic R.YA. Upravlyaemost' i upravlenie sudnom / R.YA.Pershic.. – Leningrad: Sudostroenie, 1983. – 272 s.
11. Tokarev P.N. Ocenka uslovij bezopasnogo manevrirovaniya pri vetre na malyh skorostyah hoda / P.N. Tokarev // N.Novgorod. Vestnik VGAVT. – 2019. – №60. – S. 202–212.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Токарев Павел Николаевич**, к.т.н., доцент, доцент кафедры судовождения и безопасности судоходства. Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru

**Pavel N. Tokarev**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Ship Handling and Safety of Navigation. Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951. e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru

Статья поступила в редакцию 25.06.2020 г.

УДК 621.01

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.113>

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАВЕРСЫ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 160 ТОНН

**А.С. Яблоков**

Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия

**С.А. Борунов**

Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия

**А.Д. Девин**

Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия

**В.В. Шутов**

Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Россия

*Аннотация. В статье выполняется расчет анализа напряженно-деформированного состояния траверсы с учетом дополнительных нагрузок, действующих в натуральных условиях эксплуатации. Представленная методика расчета основана на определении допускаемых напряжений и моделировании конструкции по методу конечных элементов. Разработана расчетная схема, твердотельно-деформированная модель и выполнен расчет методом конечных элементов в CAD/CAE системе. Напряженно-деформированное состояние элементов траверсы является достаточно сложным, поскольку в одном элементе в разных плоскостях возникают как напряжения сжатия, так и напряжения растяжения, которые взаимозаменяются во время работы подъемного сооружения.*

*Ключевые слова: траверса, металлоконструкция, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, моделирование, прочность, концентрация напряжений, надежность.*

### 1. Введение

Тенденция развития конструкций и аппаратов современного машиностроения характеризуется снижением металлоемкости за счет оптимального проектирования и применения высокопрочных материалов, обеспечение безопасной эксплуатации которых связано с повышенной общей и местной напряженностью конструктивных элементов и уменьшением коэффициента запаса прочности. Значительно увеличиваются требования к надежности и длительности безаварийной эксплуатации как конструкций в целом, так и отдельных её элементов. Указанные тенденции привели к тому, что в настоящее время одной из актуальных задач современной техники является задача надежной оценки ресурса конструкций, диагностики выработанного и прогноза остаточного ресурса в процессе эксплуатации.

### 2. Исходные данные для расчета

№	Наименование	Значение
1	Расчетная масса поднимаемой створки	160 тонн
2	Расчетная масса нижней траверсы	10 тонн
3	Расстояние между точками подвеса верхней траверсы	11 м
4	Расстояние между точками подвеса нижней траверсы	11 м

### 3. Определение допускаемых напряжений, действующих в металлоконструкции

Согласно [1] допускаемые напряжения определяются в виде:

$$[\sigma] = R_n c \frac{\gamma_c}{\gamma_m} \gamma_n,$$

где  $R_n$  – нормативное сопротивление, принимаемое равным

$$R_n = \min \left\{ R_{yn}; \frac{R_{un}}{1,3} \right\},$$

где  $R_{yn}$  – предел текучести материала;

$R_{un}$  – временное сопротивление материала;

$c$  – коэффициент перехода от основных к производным расчетным сопротивлениям, принимаемый равным 1,05, для сдвига  $c = 0,58$ ;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы, принимаемый равным 1,0;

$\gamma_m$  – коэффициент надежности по материалу, для стали 09Г2С по ГОСТ 19281-2014 принимаем равным 1,05;

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению принимается:

– для общих местных напряжений  $\gamma_n = 1,4$ ;

– для местных напряжений  $\gamma_n = 1,2$ .

Общие характеристики рассматриваемого материала траверсы приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики материала

Вид деформации	Марка стали	Толщина, мм	$R_n$ , МПа	Расчетные коэффициенты				Допускаемые напряжения, МПа
				$c$	$\gamma_c$	$\gamma_m$	$\gamma_n$	$[\sigma]$
Растяжение, изгиб, смятие	09Г2С	20,30,40	310	1,05	1,0	1,05	1,4	221
	09Г2С	60	290	1,05	1,0	1,05	1,4	207
	09Г2С	75	280	1,05	1,0	1,05	1,4	200
Сдвиг (срез)	09Г2С	20,30,40	310	0,58	1,0	1,05	1,2	142
	09Г2С	60	290	0,58	1,0	1,05	1,2	133
	09Г2С	75	280	0,58	1,0	1,05	1,2	128

### 4. Расчет верхней траверсы

Для определения действующих напряжений в металлоконструкции верхней траверсы построим модель в натуральную величину с соблюдением заданных характеристик и геометрических размеров. Учитывая большую сложность моделирования сварного соединения каждого листа, профиля, ребра – каждое соединение было заменено на абсолютно жесткое (аналог сварного соединения). Моделирование опор выполнялось в наложении граничных условий, исключающих перемещение этих узлов во всех направлениях. Также исключался поворот в этих узлах. Исходя из параметров используемой листовой стали, идеализация конструкции на конечные элементы проводилась с использованием балочного конечного элемента, который

является трехмерным симметричным в поперечном сечении. При моделировании металлоконструкции данным типом конечного элемента в качестве реальных констант использовались стандартные геометрические характеристики: площадь поперечного сечения балки, моменты инерции относительно двух осей (в поперечном сечении), высота поперечного сечения, ширина поперечного сечения. Расчетные исследования выполнены как для статического, так и для динамического типа приложения нагрузок. Для общего представления о характере деформирования траверсы и вычисления местоположения узлов, критических с точки зрения долговечности, на первом этапе был проведен упругий расчет по (КЭ) программе [2]. Для выполнения расчета была построена трехмерная модель верхней траверсы (рис. 4.1).

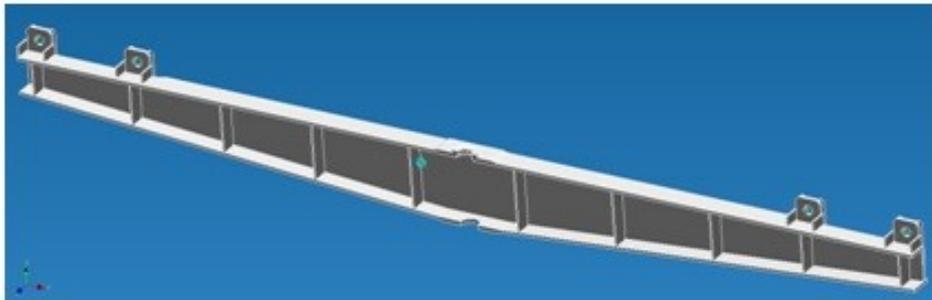


Рис. 4.1. Модель верхней траверсы

Так как конструкция траверсы симметрична относительно оси Y, то для расчета будем принимать половину симметричной модели относительно оси Y (рис. 5.1).

Указанная модель была разбита на 8, 10, 20 – узловых конечных элементы из материала с изопараметрическими свойствами для симметричной конструкции относительно продольной оси в программе «APMStudio» из пакета «APMWinmachine» (рис. 4.2).

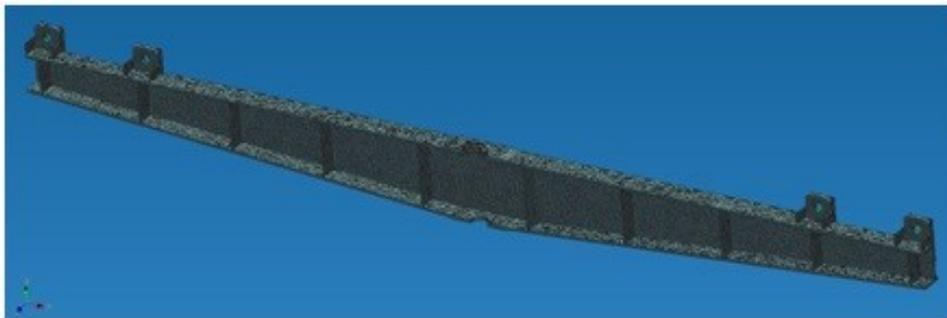


Рис. 4.2. Модель верхней траверсы с сеткой конечных элементов

Для расчета действующих напряжений в металлоконструкции верхней траверсы приложим действующую нагрузку от силы тяжести поднимаемой створки и нижней траверсы на площадь опирания упорного подшипника верхнего пояса траверсы.

$$Q = 1.25g(160 + 10) = 2084.625 \text{ кН};$$

Площадь опирания упорного подшипника определим равной –  $S = 39321,148 \text{ мм}^2$ ;  
Соответственно распределенное давление по площади опирания составит:

$$q_1 = \frac{Q}{S} = 53.02 \text{ Н/мм}^2,$$

Результаты расчета эквивалентных напряжений представлены на рис. 4.3.

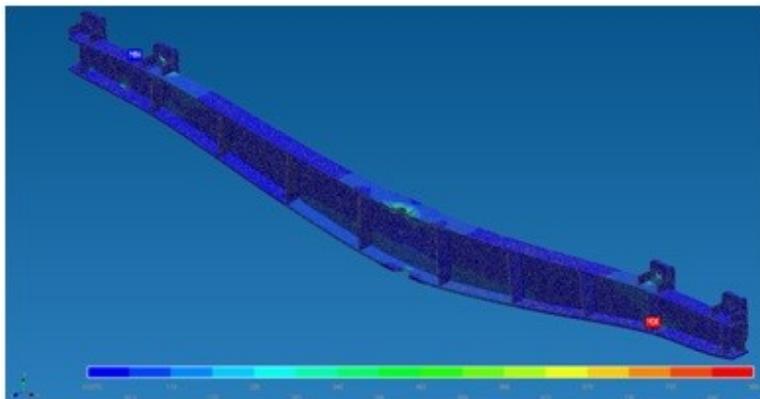


Рис. 4.3. Карта распределения эквивалентных напряжений по металлоконструкции верхней траверсы

Из анализа полученных значений определим, что наибольшие напряжения величиной 903 МПа возникают в месте сварки внутренних проушин траверсы и приводят к возникновению концентратора напряжений в месте соединения с полкой и стенкой траверсы (рис. 4.4).

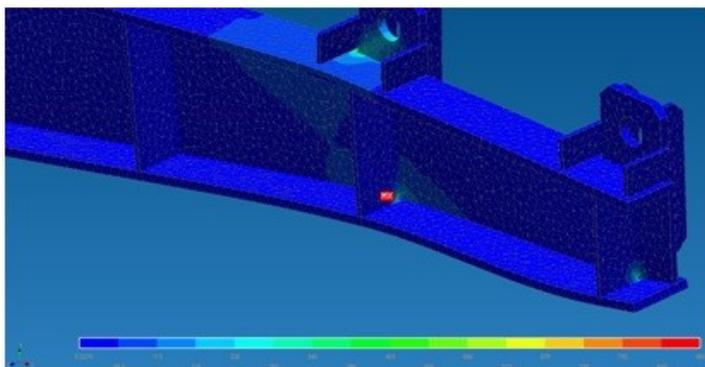


Рис. 4.4. Распределение напряжений

Распределение нормальных и касательных напряжений представлено на рис. 4.5-4.10.

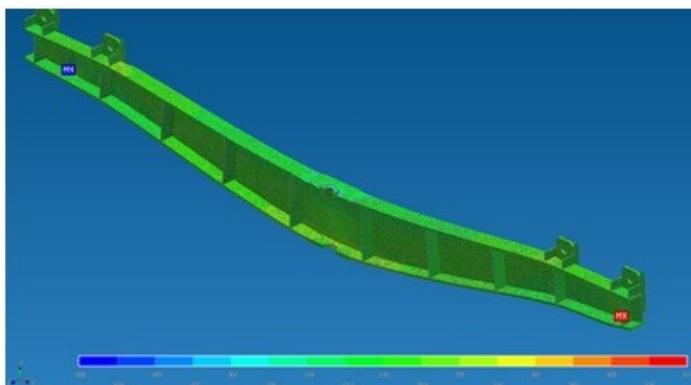


Рис. 4.5. Карта распределения нормальных напряжений по оси X

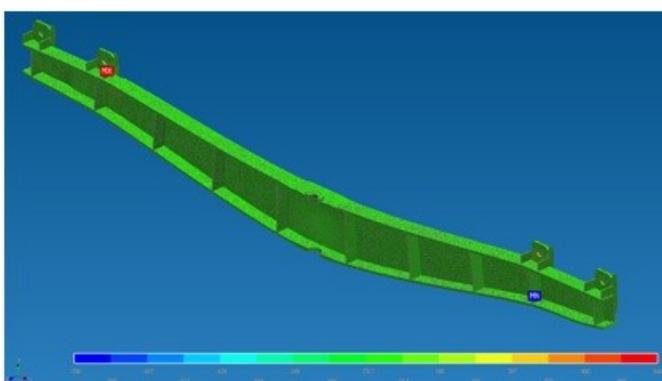


Рис. 4.6. Карта распределения нормальных напряжений по оси Y

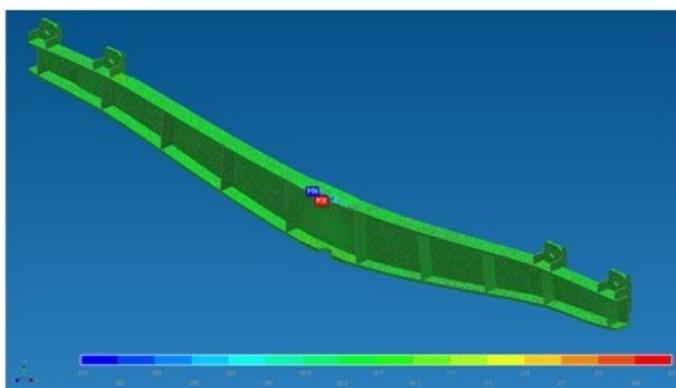


Рис. 4.7. Карта распределения нормальных напряжений по оси Z

Для анализа напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных узлов металлоконструкции траверсы выполним моделирование четверти конструкции траверсы, считая геометрию траверсы симметричной в двух плоскостях. Модель представлена на рис. 4.8.

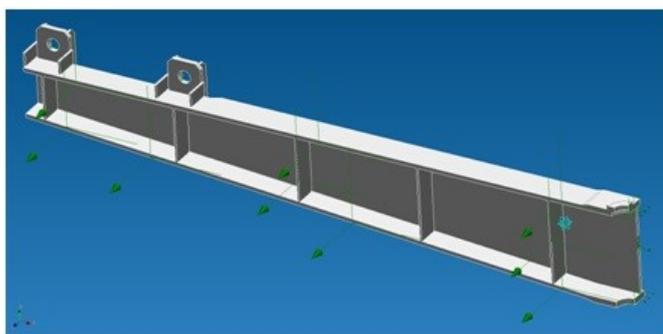


Рис. 4.8. Модель четверти траверсы

Указанная модель была разбита на 8 – узловые конечные элементы из материала с изопараметрическими свойствами для симметричной конструкции относительно продольной оси в программе «APMStudio» из пакета «APMWinmachine» (рис. 4.9).

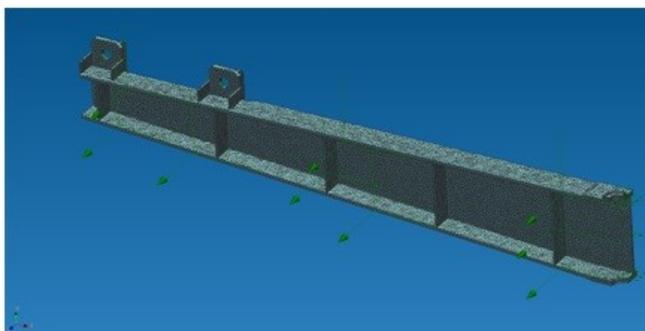


Рис. 4.9. Модель с сеткой конечных элементов

Для расчета действующих напряжений в металлоконструкции верхней траверсы приложим действующую нагрузку от силы тяжести поднимаемой створки и нижней траверсы на площадь опирания упорного подшипника верхнего пояса траверсы.

Результаты расчета эквивалентных напряжений представлены на рис. 4.10.

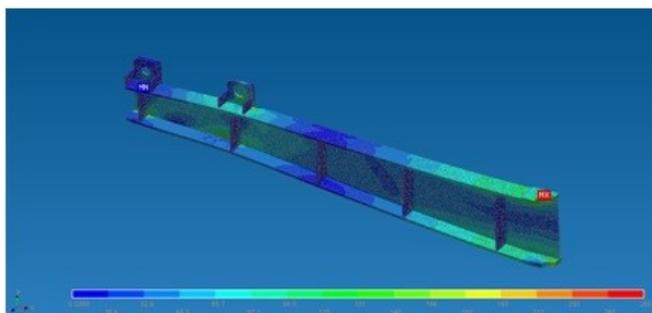


Рис. 4.10. Карта распределения эквивалентных напряжений

Схемы распределения нормальных напряжений по осям X, Y, Z представлены на рис 4.11 а-в, соответственно.

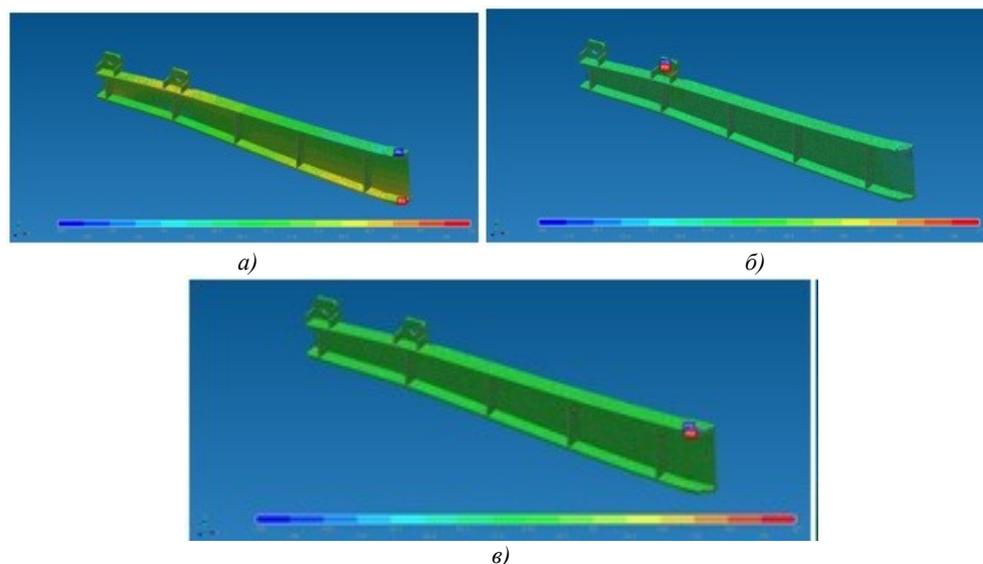


Рис. 4.11. карта распределения нормальных напряжений

Из анализа полученных значений определим, что наибольшие напряжения составляют – 187 МПа. Соответственно, полученные напряжения не превышают допустимых, определенных по нормативной документации для гидротехнических сооружений.

Вывод: конструкция верхней траверсы обладает необходимой прочностью для подъема груза, предусмотренного эксплуатационной документацией траверсы.

### 5. Расчет нижней траверсы

Для определения действующих напряжений в металлоконструкции нижней траверсы построим модель в натуральную величину с соблюдением заданных характеристик и геометрических размеров. Учитывая большую сложность моделирования сварного соединения каждого листа, профиля, ребра было заменено на абсолютно жесткое (аналог сварного соединения). Моделирование опор выполнялось в наложении граничных условий, исключающие перемещение этих узлов во всех направлениях. Также исключался поворот в этих узлах. Исходя из параметров используемой листовой стали, идеализация конструкции на конечные элементы проводилась с использованием балочного конечного элемента, который является трехмерным симметричным в поперечном сечении. При моделировании металлоконструкции данным типом в качестве реальных констант использовались стандартные геометрические характеристики: площадь поперечного сечения балки, моменты инерции относительно двух осей (в поперечном сечении), высота поперечного сечения, ширина поперечного сечения. Расчетные исследования выполнены как для статического, так и для динамического типа приложения нагрузок. Для общего представления о характере деформирования траверсы и вычисления местоположения узлов, критических с точки зрения долговечности, на первом этапе был проведен упругий расчет по (КЭ) программе [2]. Для выполнения расчета была построена трехмерная модель нижней траверсы (рис. 5.1).

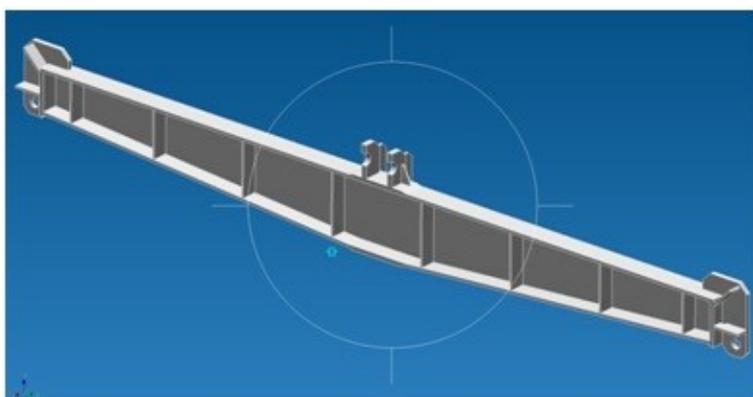


Рис. 5.1. Модель верхней траверсы

Так как конструкция траверсы симметрична, относительно оси Y, то для расчета будем принимать половину симметричной модели, относительно оси Y (рис. 5.1)

Указанная модель была разбита на 8, 10, 20 – узловые конечные элементы из материала с изопараметрическими свойствами для симметричной конструкции относительно продольной оси в программе «APMStudio» из пакета «APMWinmachine» (рис. 5.2).

Для расчета действующих напряжений в металлоконструкции нижней траверсы, приложим действующую нагрузку от силы тяжести поднимаемой створки на суммарную площадь проушин траверсы.

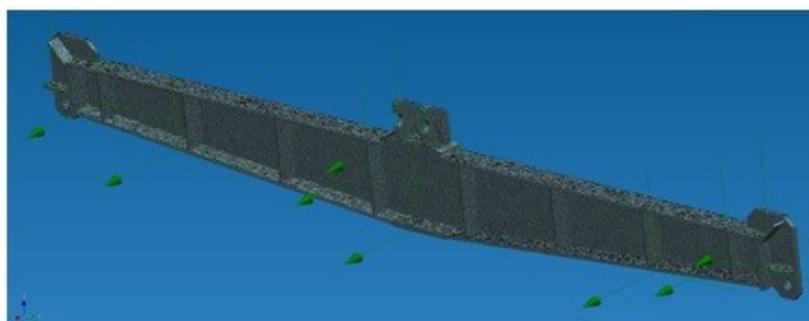


Рис. 5.2. Модель верхней траверсы с сеткой конечных элементов

$$Q_1 = 1.25g(160) = 1960 \text{ кН};$$

Площадь опирания всех проушин определим равной –  $S_1=98771,68 \text{ мм}^2$ ;

Соответственно распределенное давление по площади опирания составит:

$$q_1 = \frac{Q_1}{S_1} = 19,85 \text{ Н/мм}^2$$

Результаты расчета эквивалентных напряжений представлены на рис. 5.3.

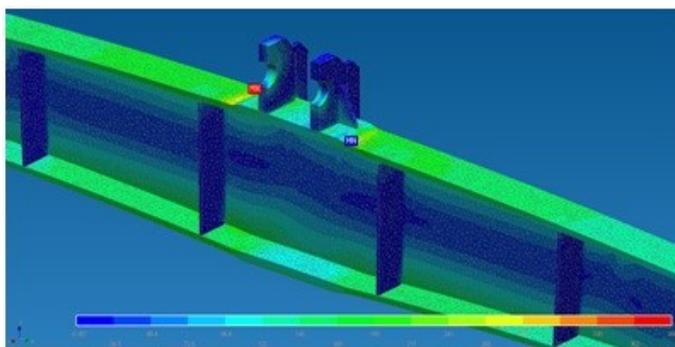


Рис. 5.3. Карта распределения эквивалентных напряжений по металлоконструкции верхней траверсы

Из анализа полученных значений, определим, что наибольшие напряжения, величиной – 285 МПа, возникают в месте сварки верхних проушин траверсы и нижней полки траверсы.

Распределение нормальных и касательных напряжений представлено на рис. 5.4–5.9.

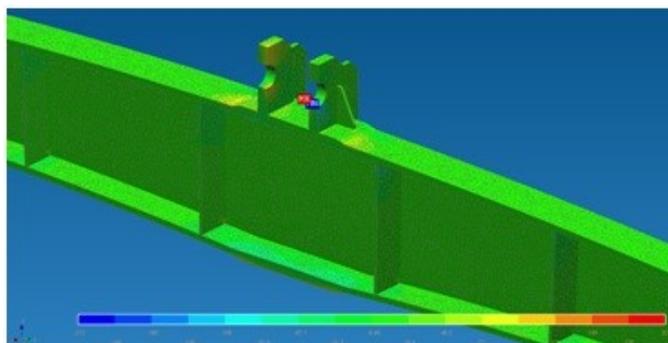


Рис. 5.4. Карта распределения нормальных напряжений по оси X

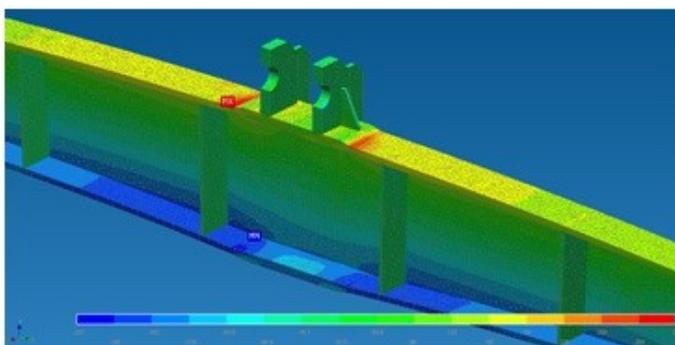


Рис. 5.5. Карта распределения нормальных напряжений по оси Y

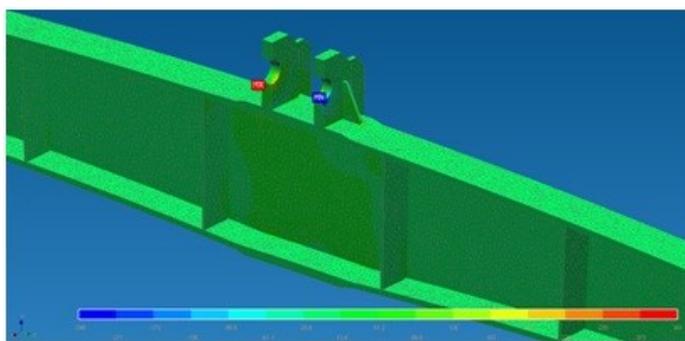


Рис. 5.6. Карта распределения нормальных напряжений по оси Z

Для анализа напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных узлов металлоконструкции траверсы, выполним моделирование четверти конструкции траверсы, считая геометрию траверсы симметричной в двух плоскостях.

Модель представлена на рис. 5.7.

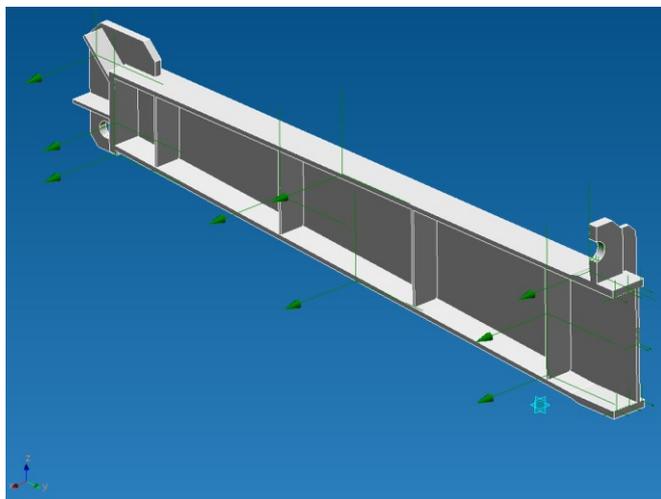


Рис. 5.7. Модель четверти траверсы

Указанная модель была разбита на 8 – узловые конечные элементы из материала с изопараметрическими свойствами для симметричной конструкции относительно продольной оси в программе «APMStudio» из пакета «APMWinmachine» (рис. 5.8).

Для расчета действующих напряжений в металлоконструкции верхней траверсы, приложим действующую нагрузку от силы тяжести поднимаемой створки на площадь опирания проушин траверсы.

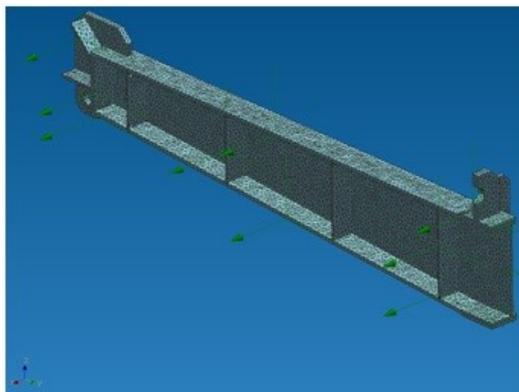


Рис. 5.8. Модель с сеткой конечных элементов

Результаты расчета эквивалентных напряжений представлены на рис. 5.9.

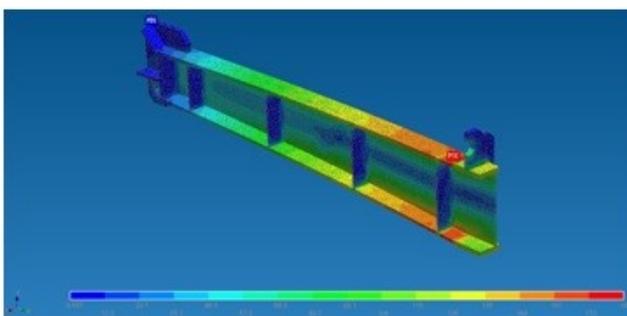


Рис. 5.9. Карта распределения эквивалентных напряжений

Схемы распределения нормальных напряжений по осям X, Y, Z представлены на рис 5.10 а-в, соответственно.

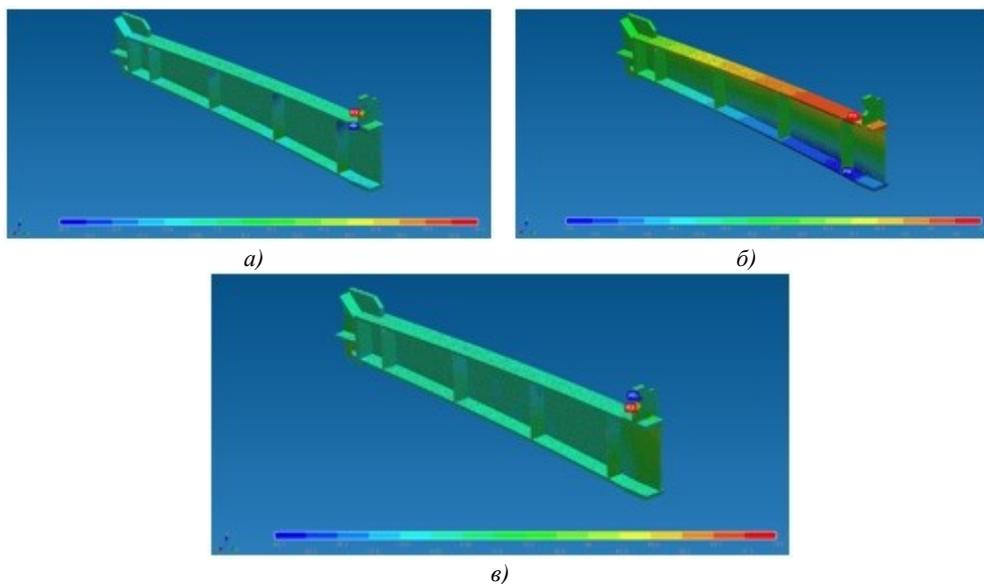


Рис. 5.10. карта распределения нормальных напряжений

Из анализа полученных значений определим, что наибольшие напряжения составляют – 183 МПа. Соответственно, полученные напряжения не превышают допустимых, определенных по нормативной документации для гидротехнических сооружений.

Вывод: конструкция нижней траверсы обладает необходимой прочностью для подъема груза, предусмотренного эксплуатационной документацией траверсы.

### 6. Расчет проушин

Для оценки прочности проушин, конструкция которых представлена в документации на проектирование БТ4014.04.00.00.000 выполним моделирование конструкции проушины, представленной на рис. 6.1

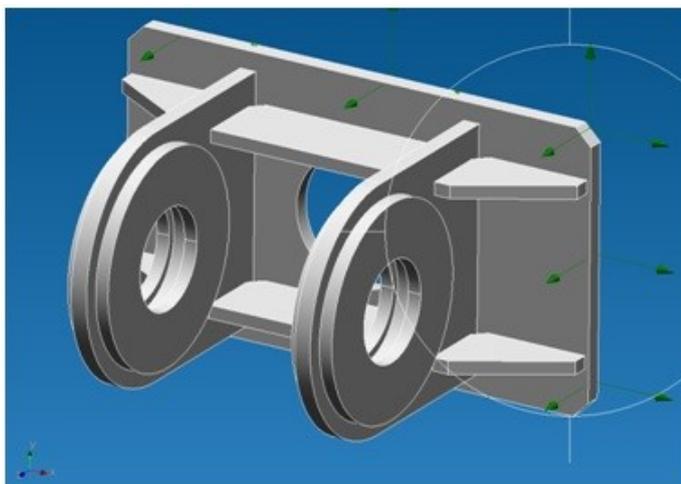


Рис. 6.1. Модель конструкции проушины

Модель конструкции проушины с сеткой конечных элементов представлена на рис. 6.2.

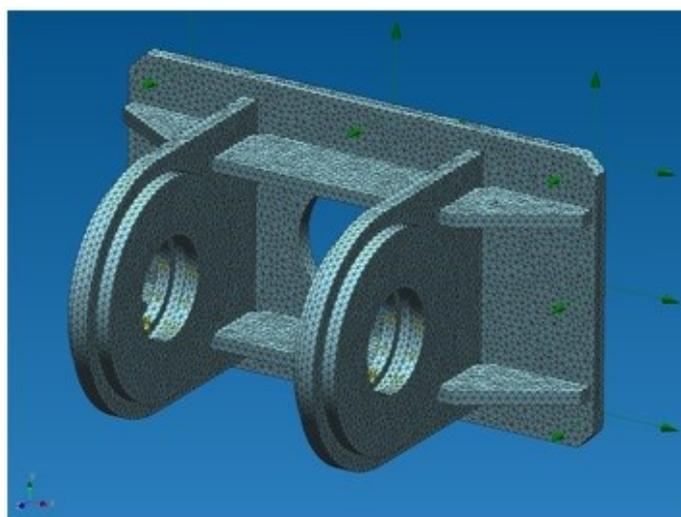


Рис. 6.2. Модель конструкции проушины с сеткой конечных элементов

Приложим к отверстиям проушины расчетное усилие, представленное в п.2.2 документации БТ4014.00.00.00.000РР01.6, результаты расчета представлены на рис. 6.3.

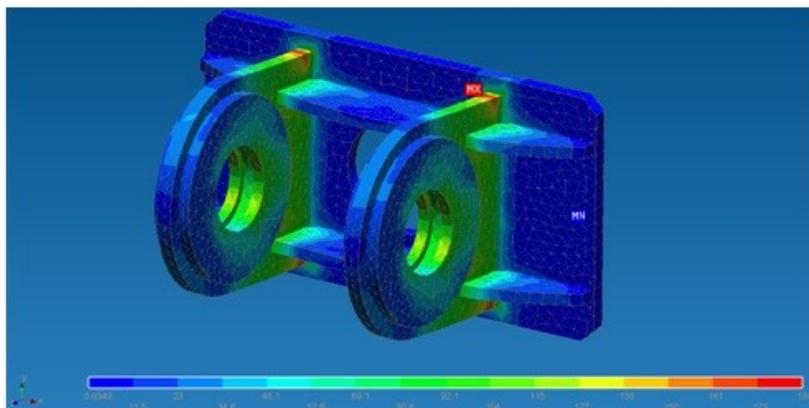


Рис. 6.3. Карта распределения эквивалентных напряжений по металлоконструкции проушины

Из анализа полученных значений определим, что наибольшие напряжения составляют – 184 МПа. Соответственно, полученные напряжения не превышают допустимых, определенных по нормативной документации для гидротехнических сооружений.

Вывод: конструкция проушины обладает необходимой прочностью.

Для оценки прочности проушин, конструкция которых представлена в документации на проектирование БТ4014.02.00.00.000 и БТ4014.03.00.00.000 выполним моделирование конструкции проушин, представленной на рис. 6.4 а, б.

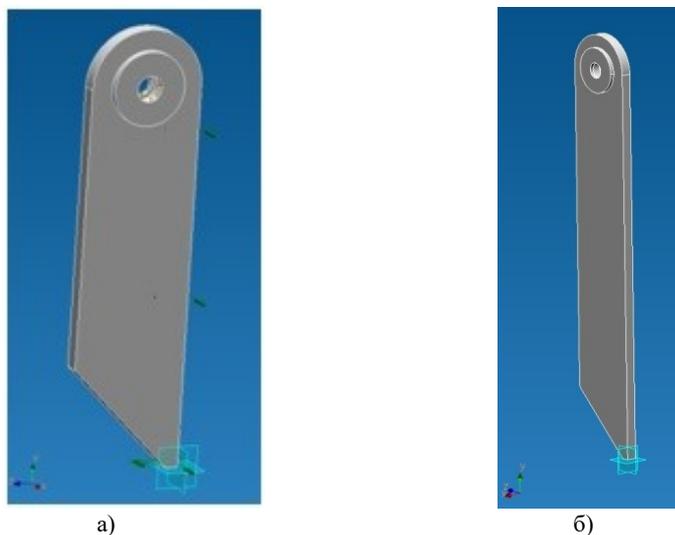


Рис. 6.4. Модель проушин

Модель проушин с сеткой конечных элементов представлена на рис. 6.5 а, б.

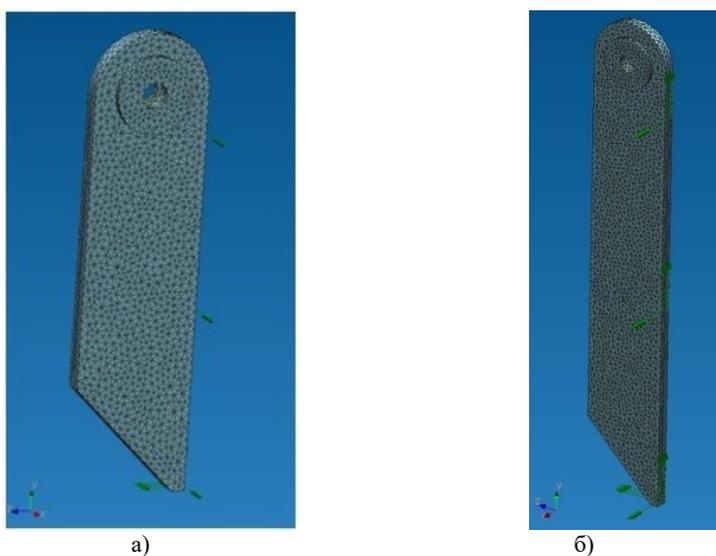


Рис. 6.5. Модель проушины с сеткой конечных элементов

Приложим к отверстиям проушины расчетное усилие, представленное в п. 4 документации БТ4014.00.00.00.000РР01.6, результаты расчета представлены на рис. 6.6.

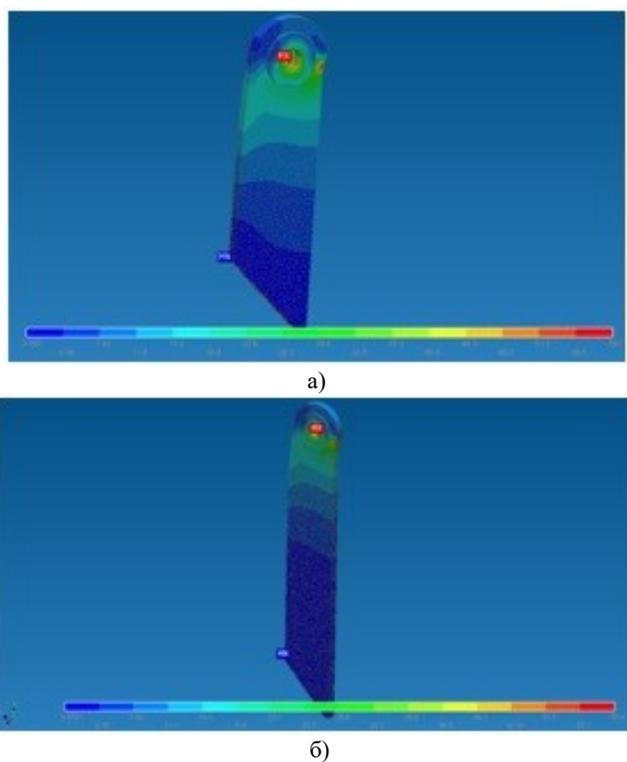


Рис. 6.6. Карта распределения эквивалентных напряжений по металлоконструкции проушины

Из анализа полученных значений, определим, что наибольшие напряжения составляют – 59,1 и 58,8 МПа. Соответственно, полученные напряжения не превышают

допустимых, определенных по нормативной документации для гидротехнических сооружений.

Вывод: конструкция проушин обладает необходимой прочностью.

## 7. Заключение

1. Представлен вариант математической модели механики поврежденной среды, развитой в работах Ю.Г. Коротких для расчета усталостной долговечности конструкций по механизму деградации многоциклового усталости материала.

Данная математическая модель позволяет учитывать

– нелинейность процесса накопления усталостных повреждений;

– нелинейность суммирования повреждений при изменении режимов нагружения или вида напряженного состояния.

2. Разработана научно-обоснованная инженерная методика расчета полей напряжений, деформаций, повреждений в опасных зонах элементов и узлов несущих конструкций по механизму деградации многоциклового усталости материала.

3. Проведён анализ кинетики напряженно-деформированного состояния элементов и узлов грузоподъемной траверсы, подверженной воздействию знакопеременного нагружения и выполнен на его основе прогноз усталостной долговечности, который показал, что данный подход пригоден для разработки на его основе экспертных систем оценки ресурса подъемных сооружений, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации.

### Список литературы:

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. – М.: Мир, 1984.
2. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. – 424с.
3. Романов А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1988. – 279с.
4. Коум, Сартори. Оценка современной методологии проектирования высокотемпературных элементов конструкций на основе экспериментов по их разрушению // Теоретические основы инженерных расчетов. 1988, № 1. С. 104 - 118.
5. Брок Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368с.
6. Патрикеев А.Б. О механизме разрушения верхних участков стальных подкрановых балок // Пром. стр.-во. – 1979, №5. С. 38–43.
7. Руководящий технический материал // Расчёты и испытания на прочность / Методы расчёта на трещиностойкость металлоконструкций мостовых кранов при статическом и циклическом нагружении. – Красноярск, 1990. – 58 с.
8. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 343с.
9. Волков И.А. Модель поврежденной среды для оценки ресурсных характеристик конструктивных сталей при механизмах истощения, сочетающих усталость и ползучесть материала / И.А. Волков, А.И. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6, № 2. С. 232–245.
10. Боднер, Линдхолм. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов // Теоретические основы инженерных расчетов. 1976, №2. С. 51–58.
11. Chaboche J. L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation // Engineering Design. 1981. vol. 64. p. 233–247.
12. Волков И.А. Численное моделирование упругопластического деформирования и накопления повреждений в металлах при малоциклового усталости / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов, Д.Н. Шишулин // Междунар. научно-технический журнал «Проблемы прочности»: изд-во Института проблем прочности НАНУ, №4. – Киев, 2011.
13. «Structure CAD» пакет «Scad Office v.11».
14. Акимов, И.А., Яблоков, А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния металлоконструкции каркаса машинного отделения плавучего крана / И.А. Акимов, А.С. Яблоков // Труды 16-го международного научно-промышленного форума «Великие реки – 2014». Мате-

риалы 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 ФГБОУ ВО «ВГАВТ», 2014. – 215–219 с.

15. Волков И.А., Яблоков А.С. Об одном подходе к оценке долговечности металлоконструкций плавучих кранов по их фактическому, эксплуатационному нагружению // Вестник ВГАВТ №42. – Н.Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГАВТ», 2015. – 56–68 с.

16. Леметр, Ж. Модель механики повреждения сплошных сред при вязком разрушении // J. Of Engineering Materials and Technology. 1985.V. 107. P. 3-9.

17. Коротких, Ю.Г. Моделирование эффектов локальной анизотропии упрочнения в рамках модели пластичности с комбинированным упрочнением / Ю.Г. Коротких, Г.А. Маковкин, В.А. Сбитнев // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов : межвуз. сб. / М.: Товарищ. научн. изд. КМК. – 1995. – С. 23–31.

18. Коротких Ю.Г. Математическое моделирование процессов деформирования и разрушения конструкционных материалов / Ю.Г. Коротких, И.А. Волков, Г.А. Маковкин – Н.Новгород: ВГАВТ, 1996. – 345 с.

19. Волков, И.А. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 424 С.

20. Трощенко, В.Т. Энергетический критерий усталостного разрушения. / Трощенко В.Т., Фомичев Л.А. // Проблемы прочности. № 1. Киев. – 1993. – С. 3–10.

21. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении / А.Н. Романов. – М.: Наука, 1988. – 279 С.

22. Chaboche, J.L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation / J.L. Chaboche // Journal Engineering Design. – 1981. – vol. 64. – P. 233–247.

23. Леметр Ж. Модель механики повреждения сплошных сред при вязком разрушении // J. of Engineering Materials and Technology. 1985. V. 107. P. 3–9

24. Боднер, Линдхолм. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов // Теоретические основы инженерных расчетов. 1976, №2. С. 51–58.

25. Chaboche J.L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation // Engineering Design. 1981. vol. 64. p. 233–247.

## EVALUATION OF STRESSED-DEFORMED CONDITIONS OF ELEMENTS TRAVERSE WITH LOAD CAPACITY OF 160 TONS

**Alexander S. Yablokov,**

*Volga State University of Water Transport,  
Nizhny Novgorod, Russia*

**Sergey A. Borunov,**

*Volga State University of Water Transport,  
Nizhny Novgorod, Russia*

**Alexander D. Devin,**

*Volga State University of Water Transport,  
Nizhny Novgorod, Russia*

**Vladislav V. Shutov,**

*Volga State University of Water Transport,  
Nizhny Novgorod, Russia*

*Abstract. The article calculates the analysis of the stress-strain state of the traverse, taking into account additional loads acting in full-scale operating conditions. The presented calculation methodology is based on determining the permissible stresses and modeling the structure using the finite element method. A design scheme, a solid-deformed model have been developed, and a finite element method has been calculated in the CAD / CAE system. To determine the operating values in the steel structure of the lower service, we will construct a model in natural values with observance of the given characteristics and geometrical dimen-*

*sions. The stress-strain state of the traverse elements is quite complex, since both compressive stresses and tensile stresses arise in one element in different planes, which are interchanged during the operation of the lifting structure. The above calculation and analysis of the strength of the metal structure of the lifting structure showed that this approach is suitable for the development on its basis of expert systems for assessing the lifespan of lifting structures, both at the stage of design and at the stage of operation*

*Keywords: traverse, metal construction, stress-strain state, finite element method, modeling, strength, stress concentration, reliability.*

#### **References:**

1. Collins J. Damage to materials in structures. Analysis.Prediction.Prevention. – М.: Mir, 1984.
2. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. Equations of state of viscoelastic plastic media with damage. – М.: Fizmatlit, 2008. – 424 p.
3. Romanov A. N. Failure under low-cycle loading. – М.: Nauka, 1988. – 279 p.
4. Corum, Sartori. Evaluation of the modern methodology for designing high-temperature structural elements based on experiments on their destruction // Theoretical Foundations of Engineering Calculations. 1988, No. 1. S. 104 – 118.
5. Broek D. Fundamentals of fracture mechanics. – М.: Higher School, 1980. – 368s.
6. Patrikeev A.B. On the mechanism of destruction of the upper sections of steel crane beams // Prom. to. – 1979, No. 5. WITH .38–43.
7. Guiding technical material // Calculations and strength tests / Methods for calculating the crack resistance of metal structures of bridge cranes under static and cyclic loading. – Krasnoyarsk, 1990. – 58 p.
8. Troshchenko VT T. Deformation and fracture of metals under high-cycle loading. – Kiev: Science. Dumka, 1981.- 343s.
9. Volkov I.A. A model of a damaged medium for assessing the resource characteristics of structural steels with exhaustion mechanisms combining fatigue and creep of a material / I.A. Volkov, A.I. Volkov, Yu.G. Korotkikh, I.S. Tarasov // Computational mechanics of continuous media. 2013.Vol. 6, No. 2. P. 232–245.
10. Bodner, Lindholm. Criterion for damage increment for time-dependent fracture of materials // Theoretical Foundations of Engineering Calculations. 1976, No. 2. S. 51 – 58.
11. Chaboche J. L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation // Engineering Design. 1981. vol. 64. p. 233–247.
12. Volkov, I.A. Numerical modeling of elastoplastic deformation and damage accumulation in metals during low-cycle fatigue. / I.A. Volkov, Yu.G. Korotkikh, I.S. Tarasov, D.N. Shishulin // Intern. scientific and technical journal «Problems of Strength»: publishing house of the Institute of Strength Problems of NASU, No. 4. – Kiev, 2011.
13. «Structure CAD» package «Scad Office v.11».
14. Akimov, I.A., Yablokov, A.S. Assessment of the stress-strain state of the metal structure of the frame of the engine room of a floating crane / I.A. Akimov, A.S. Yablokov // Proceedings of the 16th international scientific and industrial forum «Great Rivers – 2014». Materials of the scientific and methodological conference of the faculty, graduate students, specialists and students «Problems of the use and innovative development of inland waterways in the basins of great rivers.» Volume 1. – N. Novgorod: Publishing House of FSBEI HE «VGAVT», 2014. – 215 – 219s.
15. Volkov, I.A., Yablokov, A.S. About one approach to assessing the durability of metal structures of floating cranes according to their actual, operational loading // VGAVT Bulletin No. 42. – N. Novgorod: Publishing House of FSBEI HE «VGAVT», 2015. – 56 – 68s.
16. Lemeter, J. Model of the mechanics of damage to continuous media in viscous failure // J. of Engineering Materials and Technology. 1985. V. 107. P. 3-9.
17. Korotkih, JG Modeling the effects of local anisotropy in the model of hardening plasticity combined hardening / JG Korotkih, GA Makovkin, VA Sbitnev // Applied problems of strength and ductility. Numerical modeling of physical and mechanical processes: Hi. Sat. / М.: Fellow. Scien.ed. KMC. – 1995. – P. 23-31.
18. Korotkih, JG Mathematical modeling of deformation and fracture of structural materials / JG Korotkih, IA Volkov, GA Makovkin – Nizhniy Novgorod: VSAWT, 1996. – 345 p.
19. Volkov, IA Equations of state media viscoelastoplastic damaged / IA Volkov, YG Korotkih – М.: FIZMATLIT, 2008. – 424 pp

20. Troshchenko, VT Energy criterion of fatigue failure. / Troshchenko VT Fomichev LA // Problems of strength. № 1. Kiev. – 1993. – P. 3-10.
21. AN Romanov The destruction in the low-cycle loading / AN Romanov. – Moscow: Nauka, 1988. – 279 pp
22. Chaboche, J.L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation / JL Chaboche // Journal Engineering Design. – 1981. – vol. 64. – P. 233-247.
23. Lemaitre J. Model of damage mechanics of continuous media with the ductile fracture // J. of Engineering Materials and Technology. 1985. V. 107. P. 3-9.
24. Bodner, Lindholm. The criterion for the increment of damage depends on the destruction of materials // Theoretical bases of engineering calculations. 1976, №2. S. 51–58.
25. Chaboche JL Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation // Engineering Design. 1981. vol. 64. p. 233–247.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Яблоков Александр Сергеевич**, к.т.н., доцент, доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mip.res.cent@yandex.ru

**Alexander S. Yablokov**, Ph.D., associate professor, associate professor of the chair of lifting and transporting machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951. e-mail: mip.res.cent@yandex.ru

**Борунов Сергей Александрович**, магистрант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mip.res.cent@yandex.ru

**Sergey A. Borunov**, graduate student, Department of Hoisting-and-Transport Machines and Machine Repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

**Девин Александр Дмитриевич**, магистрант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mip.res.cent@yandex.ru

**Alexander D. Devin**, graduate student, Department of Hoisting-and-Transport Machines and Machine Repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

**Шутов Владислав Вадимович**, магистрант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: mip.res.cent@yandex.ru

**Vladislav V. Shutov**, graduate student of the department of lifting and transporting machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

Статья поступила в редакцию 09.06.2020 г.

## **Раздел IV**

**Эксплуатация судового  
энергетического оборудования**



## **Section IV**

***Operation of ship power equipment***



УДК 621.431

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.114>

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

**О.К. Безюков**

*Государственный университет морского и речного флота,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**В.А. Жуков**

*Государственный университет морского и речного флота,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4045-4504>*

**А.А. Пуляев**

*Государственный университет морского и речного флота,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

*Аннотация. Статья посвящена описанию конструкции экспериментальной установки, обеспечивающей получение новых данных о кавитационно-эрозионных разрушениях в высокотемпературных системах охлаждения. На основании анализа отечественных и зарубежных источников научно-технической информации касающихся исследований кавитационных процессов установлены технические объекты, в которых имеют место кавитационные процессы, факторы, влияющие на интенсивность кавитационно-коррозионных разрушений, определены методы, которые используются для исследования кавитации. Предложена модернизированная конструкция лабораторной установки, основным элементом которой является высокочастотный магнитоэлектрический вибратор. Благодаря герметичной экспериментальной полости установка позволяет определять интенсивность кавитационно-эрозионных разрушений при высоких температурах жидкости и давлениях выше атмосферного, характерных для высокотемпературного охлаждения судовых дизелей. Использование установки позволит получить корректные сведения о ресурсе элементов систем высокотемпературного охлаждения судовых дизелей.*

*Ключевые слова: кавитация, кавитационно-эрозионные разрушения, методы исследования кавитации, судовые дизели, высокотемпературное охлаждение, лабораторная установка*

### Введение

Кавитационные процессы являются объектом научных исследований уже более ста лет. Согласно сведениям, приведенным в работе [1], термин «кавитация» в науку был введен в 1894 году английским инженером-исследователем Р. Фрудом, сыном выдающегося ученого У. Фруда [2]. Явление кавитации (зарождение и схлопывание газовой или паровой полости или каверны в жидкости), условия и механизм возникновения каверн, динамика их роста и схлопывания в различных условиях достаточно подробно рассмотрены в работах [3–9].

Процесс кавитации носит локальный характер, зависит от большого количества факторов, протекает за очень короткий временной период. Все это осложняет процесс изучения и исследования кавитационных процессов. Одними из первых работ, посвященных исследованиям процессов кавитации, имеющих место в судостроении и судовой энергетике, являются работы [10–13].

Обзор научно-технической литературы свидетельствует, что проблема защиты элементов судовых энергетических установок от кавитационно-эрозионных и кавитационно-коррозионных разрушений продолжает оставаться актуальной.

Сохранение актуальности обусловлено, прежде всего, тем, что кавитационные процессы, имея одинаковую природу, продолжают приводить к разрушениям гребных винтов и подводных крыльев судов [14–19], элементов гидропривода, рабочих колес циркуляционных насосов и пластинчатых машин гидравлических систем [20–23], цилиндрических втулок поршневых двигателей [24, 25], элементов топливной аппаратуры двигателей [26–28].

Кавитационно-эрозионные разрушения деталей энергетических установок, двигателей, машин и механизмов различного назначения существенно сокращают их ресурс и снижают эффективность их работы [29–32].

Основными способами защиты поверхностей деталей машин и механизмов от кавитационно-эрозионных разрушений являются разработка сплавов титана [33] и меди [34, 35], обладающих высокой износостойкостью, и защитных покрытий на основе никеля и кобальта [36, 37], а также покрытий из композитных материалов [38].

Определение влияния различных факторов на интенсивность коррозионно-эрозионных разрушений и оценка эффективности защиты поверхностей деталей от таких разрушений сохраняет важное научное и прикладное значение.

### **Методы и материалы**

Основными факторами, определяющими характер кавитационных процессов и интенсивность вызываемых ими разрушений, и в связи с этим представляющими интерес для исследователей, являются: химический состав жидкости [39–43], параметры и структура потока [44, 45], температура жидкости [46–50].

Сложность кавитационных процессов и многообразие факторов, влияющих на них, обуславливают необходимость использования различных методов научных исследований. Анализ литературных источников показал, что для исследования природы кавитационно-эрозионных разрушений, динамики зарождения и схлопывания парогазовых полостей, способностей материалов и покрытий противостоять кавитационно-эрозионным разрушениям применяются следующие основные методы: визуального наблюдения и видеосъемки [51–53], численного моделирования с использованием специализированного программного обеспечения [54–58], контроля шероховатости поверхности, подвергавшейся кавитационно-эрозионному воздействию [59–61], вибрационного воздействия на экспериментальные образцы [62–65] с последующим определением потери массы образцов.

Проведенный обзор научно-технической литературы показывает, что к деталям, подверженным кавитационно-эрозионным разрушениям, относятся элементы систем охлаждения судовых дизелей (цилиндрические втулки, рабочие колеса циркуляционных насосов, запорная арматура). Анализируя условия работы деталей систем охлаждения судовых дизелей, необходимо учитывать тенденцию расширения использования высокотемпературного охлаждения (ВТО), достоинства которого описаны в работах [66–68]. Необходимо отметить, что в работах, посвященных высокотемпературным системам охлаждения судовых дизелей, не уделено внимание исследованию влияния особенностей ВТО (температуры охлаждающей жидкости, давления в системе охлаждения) на протекание кавитационных процессов. С целью исследования влияния указанных факторов на интенсивность кавитационно-эрозионных разрушений в условиях высокотемпературных систем охлаждения судовых дизелей был разработан и создан экспериментальный стенд.

В качестве исходной информации при разработке стенда использовались источники [69, 70], а также конструкция стенда, описанного в работе [34] (рис. 1). Основными элементами установки являются высокочастотный магнитоэрозионный вибратор, сосуд, заполненный жидкостью, которая охлаждается в процессе испытаний и

образец исследуемого материала, износ которого определяется последующим взвешиванием или оценкой характеристик поверхности.

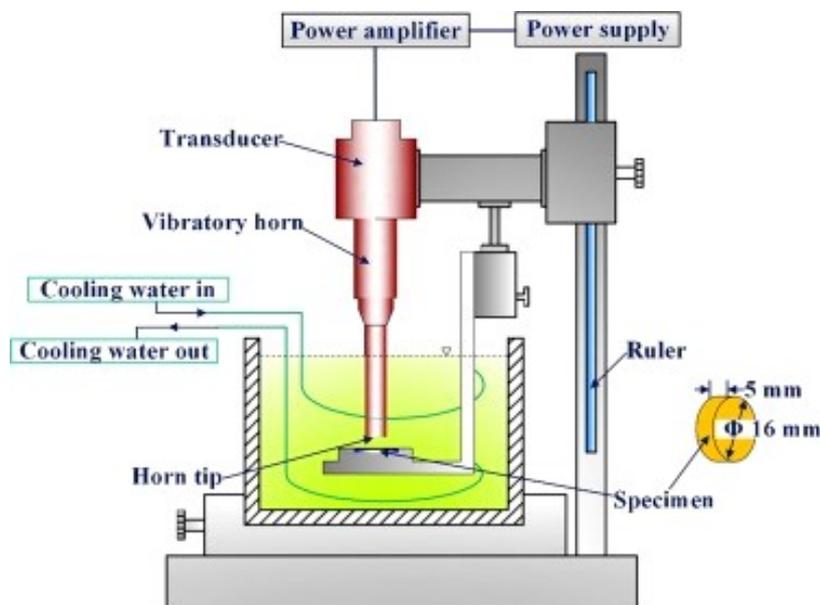


Рис. 1. Вибрационная установка для исследования кавитационной стойкости материалов

Недостатками рассмотренных аналогов является ограниченность области исследований из-за отсутствия возможности изменять температуру и давление рабочей жидкости, состава газа над ее свободной поверхностью из-за негерметичности рабочей камеры.

Из-за использования негерметичной рабочей камеры в данном устройстве невозможно:

1. Проведение исследований кавитационного разрушения материалов при различных давлениях и температурах жидкости.
2. Проведение исследований эрозионных разрушений при температурах образцов материалов, отличных от температуры кавитирующей жидкости.
3. Исследовать влияние состава и свойств газов над поверхностью кавитирующей рабочей жидкости на интенсивность эрозионных разрушений.
4. Обеспечить контроль и регулирование температуры и исследуемого образца, с целью определения их влияния на интенсивность кавитационных разрушений.

Выявленные недостатки прототипа являются причиной невозможности получения достоверных результатов исследования эрозионных процессов в условиях повышенных температур и давлений, характерных для высокотемпературного охлаждения судовых дизелей, при различном физико-химическом составе газа над свободной поверхностью кавитирующей жидкости, что снижает точность оценки предельного срока эксплуатации элементов оборудования, машин и механизмов (двигателей внутреннего сгорания, насосов, теплообменных аппаратов и т.д.).

## Результаты

Результатом разработки является устранение указанных недостатков путем создания устройства, способного обеспечить проведение исследования процессов кавитационного изнашивания в условиях температур и давлений, отличных от атмосферных, при различном составе газа над поверхностью рабочей жидкости, при температуре

образцов отличной от температуры кавитирующей жидкости и выявления влияния этих факторов на эрозионную стойкость различных конструкционных материалов.

Сопоставление предлагаемого устройства для исследования кавитационной прочности материалов с аналогичными устройствами показало, что поставленная задача – обеспечение проведения исследования процессов изнашивания оборудования в широком диапазоне температур и давлений кавитирующей рабочей жидкости различного физико-химического состава, а также различного состава газов над ее свободной поверхностью, температуры исследуемых образцов и выявления их влияния на эрозионную стойкость конструкционных материалов, решается в результате модернизации конструкции установки. Конструкция и принцип действия разработанной установки представлены на рис. 2.

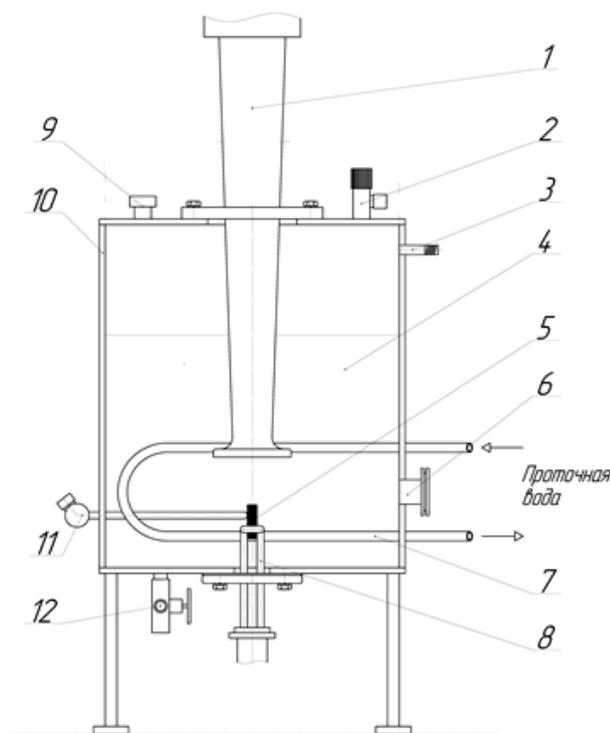


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – магнитострикционный вибратор; 2 – предохранительный клапан; 3 – невозвратный клапан; 4 – исследуемая жидкость в экспериментальной камере; 5 – образец испытуемого материала; 6 – смотровое окно; 7 – проточный охладитель (змеевик); 8 – нагреватель испытуемого образца; 9 – заливная горловина; 10 – экспериментальная емкость (камера); 11 – терморегулятор; 12 – сливной кран

Установка состоит из магнитострикционного вибратора 1, создающего эффект ультразвуковых колебаний в жидкости 4, герметичной емкости 10, способной выдерживать повышенное давление или вакуум и оснащенная заливной горловиной 9 и сливным клапаном 12, служащими для наполнения емкости 10 и замены жидкости 4, предохранительным клапаном 2, обеспечивающим постоянство давления при проведении испытаний и безопасность установки; невозвратного клапана 3, служащего для подключения компрессора с целью изменения давления в рабочей емкости 10, испытуемого образца 5, смотрового окна 6, служащего для наблюдения за процессами, протекающими в емкости 10, и замеров температур жидкости 4, и испытываемого образца 5 с помощью пирометра или тепловизора, змеевика 7, помещенного в емкость

10 и выполняющего функцию охладителя жидкости, обеспечивающего постоянство заданной температуры жидкости 4 за счет циркулирующей проточной воды, термоэлектрического нагревателя 8, служащего для нагревания испытуемых образцов и жидкости, терморегулятора 11, обеспечивающего автоматическое поддержание заданной температуры испытуемого образца 5.

Устройство для исследования кавитационной прочности материалов работает следующим образом.

Испытываемый образец 5, выполненный из чугуна, стали или другого материала, помещают в термоэлектрический нагреватель 8. Внутри герметичной емкости 10 через горловину 9 заливают исследуемую жидкость 4 (например, пресную или морскую воду, бензин или дизельное топливо, спирт или водотопливную эмульсию). Затем герметизируют емкость 10, заполняют объем над свободной поверхностью исследуемой жидкости 4 воздухом или иным газом и с помощью компрессора обеспечивают его заданное давление.

С помощью змеевика 7 и термоэлектрического нагревателя 8 обеспечивают нагрев и поддержание заданных температур образца 5 и исследуемой жидкости 4.

Затем включают ультразвуковой генератор, который обеспечивает колебания магнитострикционного вибратора 1, что создает образование кавитационного облака над поверхностью образца 5. Замыкание кавитационных пузырьков вызывает эрозионные разрушения образца 5 в зависимости от эрозионной прочности его материала, температуры образца 5, физико-химических свойств, давления и температуры жидкости 4 и физико-химических свойств и концентрации растворенного в ней газа.

Терморегулятор, входящий в состав установки, обеспечивает автоматическое поддержание заданных температур испытуемого образца 5 и жидкости 4, находящейся в емкости 10, в процессе проведения исследований.

Периодическое взвешивание образца 5 позволяет определить динамику разрушений и прогнозировать эрозионную стойкость деталей оборудования, которые изготовлены из этого же материала.

### **Обсуждение**

Таким образом, задача получения достоверной информации об интенсивности кавитационно-эрозионных разрушений деталей систем охлаждения судовых дизелей в условиях высокотемпературного охлаждения решается за счет того, что в созданной экспериментальной установке, благодаря применению герметичной емкости, компрессора, повышающего давление в полости над жидкостью, нагревателя испытуемого образца и охладителя жидкости обеспечена возможность исследования кавитационных разрушений материалов при давлениях как выше, так и ниже атмосферного и температурах жидкости от температуры замерзания до температуры кипения, использования различных газов над поверхностью кавитирующей жидкости.

Достоинствами предложенного технического решения являются возможность проведения исследований кавитационного разрушения материалов:

- в широком диапазоне давлений и температур, в том числе отличных от атмосферных (комнатных);
- при температурах образцов, изготовленных из различных материалов и имеющих температуру отличающуюся от температуры кавитирующей жидкости;
- при различных составах и свойствах охлаждающих жидкостей, которые могут быть использованы в системах охлаждения судовых дизелей;
- при различном составе газов над поверхностью кавитирующей рабочей жидкости на интенсивность эрозионных разрушений.

### Заключение

Проведение исследований на предлагаемой установке позволит определить влияние широкого перечня факторов на интенсивность кавитационных разрушений элементов энергетического оборудования, машин и механизмов.

Для проведения исследований разработан план многофакторного эксперимента, в котором в качестве факторов (регулируемых параметров) использованы температура жидкости, температура образца, статическое давление в камере, вязкость жидкости. При необходимости получения дополнительной информации, перечень регулируемых параметров может быть расширен.

### Список литературы:

1. Рождественский В.В. Кавитация / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977. – 247 с.
2. Готман А.Ш. К 200-летию со дня рождения Вильяма Фруда // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2011.– Т. 4, № 1. – С. 88-96.
3. Knapp R.T. Recent investigations of the mechanics of cavitation and cavitation damage // *IEEE ASME*, 75 (8) (1955), pp. 1045-1054.
4. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир. – 1974. – 687 с.
5. Hammit F.G. Observations on cavitation damage in a flowing system // *Trans. ASME J. Basic Eng.*, 85 (1963), pp. 347-356
6. K. Endo, T. Okada, Y. Baba. Fundamental studies on cavitation erosion // *Bull. JSME*, 12 (52) (1969), pp. 729-737
7. Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1978. – 224 с.
8. Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений / А.Н. Иванов. – Л.: Судостроение, 1980. – 237 с.
9. Запорожец Е.П. Гидромеханическая кавитация / Е.П. Запорожец, Г.П. Зиберт, Е.Е. Запорожец. – М.: ИРЦ Газпром.– 2003. – 129 с.
10. Kato H. A consideration on scaling laws of cavitation erosion // *Int. Shipbuild. Prog.*, 22 (253) (1975), pp. 305–327
11. Георгиевская Е.П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е.П. Георгиевская. –Л.: Судостроение, 1978. –206 с.
12. Погодаев Л.И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л. И. Погодаев, П.А. Шевченко. – Л.: Судостроение, 1984. –264 с
13. Иванченко Н.Н. Кавитационные разрушения в дизелях / Н. Н Иванченко, А.А. Скуридин, М.Д. Никитин; ред. Н.Н. Иванченко. – Л.: Машиностроение, 1970. –152 с.
14. Горбаченко Е.О. Прогнозирование инкубационного периода кавитационного изнашивания лопастей гребных винтов с использованием метода измерения профиля поверхности / Е.О. Горбаченко, Ю.Н. Цветков / *Вестник волжской государственной академии водного транспорта*. – 2017. – №52. – С. 87–95.
15. Pereira F., Salvatore F., Felice F. Measurement and modelling of propeller cavitation in uniform inflow // *J. Fluids Eng.*, 126 (2004), pp. 671-679.
16. Яковлев А.Ю., Коваль А.А. Новые исследования кавитации гребных винтов. // *Судостроение*. 2010. – № 2 (789). – С. 12–14.
17. Onur Usta, Emin Korkut. Prediction of cavitation development and cavitation erosion on hydrofoils and propellers by Detached Eddy Simulation // *Ocean Engineering*. – Volume 1911 November 2019.– Article 106512
18. Feng Cheng, Weixi Ji, Chenhao Qian, Xu. Jie. Cavitation bubbles dynamics and cavitation erosion in water jet // *Results Phys*, 9 (2018). – pp. 1585–1593
19. Batuhan Aktas, Onur Usta, Mehmet Atlar. Systematic investigation of coating application methods and soft paint types to detect cavitation erosion on marine propellers // *Applied Ocean Research* Volume 94 January 2020 Article 101868
20. Маслов Н.А. Анализ неисправностей пластинчатых гидромашин путевой техники, вызванных чрезмерным давлением, аэрацией гидравлического масла и кавитацией. // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2016. – № 1 (36). – С. 5–15.
21. Степанов А.М. Щелевая кавитация в судовых осевых насосах / А.М. Степанов, А.Л. Федоров // *Судостроение*. – 2001. – № 3 (736). – С. 27–29.
22. Минеев А.В. Некоторые вопросы влияния кавитации при работе гидроприводов машиностроительной техники различного направления, изготовления и способов эксплуатации / А.В.

- Минеев, А.С. Каверзина, А.А. Тимко. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2015. – № 10. – С. 36–37.
23. Каверзина А.С. Проблемы кавитации в гидроприводе самоходных машин и способы ее снижения / А.С. Каверзина, А.В. Минеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. – № 6. – С. 171–176.
24. Погодаев Л.И. Расчет долговечности цилиндровых втулок дизельных двигателей при вибрационной кавитации / Л.И. Погодаев, А.А. Кузьмин, Ю.К. Лопарев // В книге: Надежность судового оборудования. СПб., – 2015. – С. 44–56.
25. Валишин А.Г. Оценка ресурса цилиндровых втулок ДВС при вибрационной кавитации. // Двигателестроение. 2008. – № 1 (235). – С. 20–23.
26. Буддаков А.Г. Кавитация в насосах жидкостных ракетных двигателей / А.Г. Буддаков, Е.М. Красва // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. – Т. 1. № 8. – С. 47.
27. Maxwell Brunhart, Celia Soteriou, Christian Daveau, Manolis Gavaises, Mark Winterbourn. Cavitation erosion risk indicators for a thin gap within a diesel fuel pump // Wear. – Volumes 442–443, 15 February 2020. – Article 203024.
28. Marco Cristofaro, Wilfried Edelbauer, Phoivos Koukouvinis, Manolis Gavaises. A numerical study on the effect of cavitation erosion in a diesel injector // Applied Mathematical Modelling. – Volume 78, February 2020. – Pages 200–216.
29. Абачараев И.М. Аналитический подход к расчету эксплуатационной стойкости материалов в условиях воздействия кавитации // В сб.: Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах. Сб. тр. международной конференции. Российская академия наук Дагестанский научный центр Институт физики; Дагестанский гос. ун-т. – 2005. – С. 208–211.
30. Кукинова Г.В. Оценка интенсивности общего и местного гидроабразивного изнашивания с учетом кавитации // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2007. – № 4-1 (52). – С. 164–167.
31. Тузов Л.В. Вибрация судовых ДВС / Л.В. Тузов, О.К. Безюков, О.В. Афанасьева. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та.– 2012.– 348 с.
32. Аюгин П.Н. Кавитация и ее влияние на эффективность работы системы охлаждения / П.Н. Аюгин, Н.П. Аюгин // В сб. Актуальные проблемы инженерно-технического обеспечения АПК. Материалы Международной научно-практической конференции. Курск: Изд-во Курской гос. сельскохозяй. акад. им. проф. И.И. Иванова. – 2013. – С. 77–82.
33. W.H. Xian, D.G. Li, D.R. Chen. Investigation on ultrasonic cavitation erosion of TiMo and TiNb alloys in sulfuric acid solution // Ultrasonics Sonochemistry.– Volume 62, April 2020.– Article 104877
34. Haixia Liu, Jinhao Chen, Jie Sun, Can Kang. Influence of the concentration of NaHCO<sub>3</sub> solution on cavitation erosion of copper alloy // Results in Physics. – Volume 13, June 2019.– Article 102145
35. Q.N. Song, Y. Tong, N. Xu, S.Y. Sun, Y.X. Qiao. Synergistic effect between cavitation erosion and corrosion for various copper alloys in sulphide-containing 3.5% NaCl solutions // Wear.– Volumes 450–451 June 2020. – Article 203258
36. Enkang Hao, Xia Liu, Yulong An, Huidi Zhou, Fengyuan Yan. The coupling effect of immersion corrosion and cavitation erosion of NiCoCrAlYTa coatings in artificial seawater // Corrosion Science In press, corrected proof Available online 2 April 2020 Article 108635
37. Xiang Ding, Yan Huang, Chengqing Yuan, Zhangxiong Ding. Deposition and cavitation erosion behavior of multimodal WC-10Co4Cr coatings sprayed by HVOF // Surface and Coatings Technology Volume 39225 June 2020 Article 125757
38. Marija M. Vuksanović, Nataša Z. Tomić, Maja Gajić-Kvašček, Veljko R. Djokić, Radmila Jančić Heinemann. The influence of alumina crystal structures on the morphology and surface erosion of PMMA composite materials exposed to cavitation testing // Wear Volumes 436–437 15 October 2019 Article 203033
39. Непомнящий В.А. Влияние физических свойств жидкости на возникновение и развитие кавитации в гидросистемах // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2010. № 1 (16). С. 33–38.
40. Il-Cho Park, Seong-Jong Kim. Effect of pH of the sulfuric acid bath on cavitation erosion behavior in natural seawater of electroless nickel plating coating // Applied Surface Science.– Volume 48331.– July 2019.– Pages 194–204.
41. C.T. Kwok, F.T. Cheng, H.C. Man. Synergistic effect of cavitation erosion and corrosion of various engineering alloys in 3.5% NaCl solution // Mater Sci Eng, A, 290 (2000), pp. 145–154

42. Безюков О.К. Охлаждающие жидкости транспортных ДВС / О.К. Безюков, В.А. Жуков. – СПб.: СПГУВК, 2009. – 263 с.
43. Безюков О.К. Комплексная оптимизация параметров охлаждения судовых энергетических установок / О.К. Безюков, В.А. Жуков // Журнал университета водных коммуникаций. – 2012. – №1. – С. 51–61.
44. Markku Ylönen, Jean-Pierre Franc, Juha Miettinen, Pentti Saarenrinne, Marc Fivel. Shedding frequency in cavitation erosion evolution tracking // International Journal of Multiphase Flow.-Volume 118.– September 2019.– Pages 141–149.
45. Tengfei Cai, Yan Pan, Fei Ma Effects of nozzle lip geometry on the cavitation erosion characteristics of self-excited cavitating waterjet // Experimental Thermal and Fluid Science Volume 1171.– September 2020.– Article 110137
46. Сосиков В.А. Особенности кавитации жидкостей вблизи температуры замерзания / В.А. Сосиков, А.В. Уткин // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 3. С. 10–16.
47. Markus Hosbach, Romuald Skoda, Tobias Sander, Uwe Leuteritz, Michael Pfitzner. On the temperature influence on cavitation erosion in micro-channels // Experimental Thermal and Fluid Science In press, journal pre-proof Available online.– 11 April 2020.– Article 110140
48. Исследование влияния температуры жидкости на активность кавитации / В.В. Шаплыко, А.В. Красовский, А.В. Котухов, Н.В. Дежкунов // В сб.: Современные тенденции развития науки и производства. Западно-Сибирский научный центр, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Международный научно-образовательный центр КузГТУ-Arena Multimedia. – 2014. – С. 145.
49. Li Zhen, Han Jiesheng, Lu Jinjun, Zhou Jiansong, Chen Jianmin. Vibratory cavitation erosion behavior of AISI304 stainless steel in water at elevated temperatures // Wear, 321 (2014), pp. 33–37
50. Безюков О.К. Выбор параметров охлаждения судовых дизелей / О.К. Безюков, В.А. Жуков, А.А. Пуляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2018. – №2(48). – С. 379–389.
51. Tukker J., Kuiper G.. High-speed Video Observations and Erosive Cavitation // 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Germany, Lübeck, August 2004.
52. Jaekwon Jung, Seung-Jae Lee, Jae-Moon Han. Study on Correlation between Cavitation and Pressure Fluctuation Signal Using High-Speed Camera System // Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation CAV 2009, August 17-22 2009, Ann Arbor, Michigan, USA1CAV 2009 – Paper № 27.
53. Гусак А.Г. Исследование кавитации в свободновихревом насосе методом визуального наблюдения / А.Г. Гусак, А.И. Котенко, В.Ф. Герман // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 6. № 7 (48). С. 7-9.
54. Иваницкий Г.К. Численное моделирование динамики пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2011. № 2 (7). С. 52-58.
55. Гайнутдинова Д.Ф. Вычислительное моделирование области возникновения кавитации при вибрациях / Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, А.В. Козлова // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 127-129.
56. Бубнов М. Изучение процессов кавитации и изнашивания рабочих колес гидромашин посредством решений ANSYS / М. Бубнов, Л. Тищенко, А. Ковалев // САПР и графика. – 2014. – № 9 (215). – С. 56-58.
57. Sedlar M., Soukal J., Kratky T., Vyroubal M. Численное прогнозирование кавитации в энергетических насосах // Теплоэнергетика. – 2015. – № 6. – С. 23.
58. Schreiner F., Paepenmüller S., Skoda R. 3D flow simulations and pressure measurements for the evaluation of cavitation dynamics and flow aggressiveness in ultrasonic erosion devices with varying gap widths // Ultrasonics Sonochemistry In press, journal pre-proof Available online 31 March.– 2020.– Article 105091.
59. Цветков Ю.Н. Прогнозирование кавитационной износостойкости хромовых электролитических покрытий по профилю изношенной поверхности / Ю.Н. Цветков, Е.О. Горбаченко, В.А. Голицын // Вестник машиностроения. – 2019. – № 4. – С. 79–86.
60. Цветков Ю.Н. Испытание сталей на кавитационное изнашивание с применением метода измерения профиля поверхности / Ю.Н. Цветков, Е.О. Горбаченко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – № 7. – С. 54–58.
61. Цветков Ю.Н. Применение метода измерения шероховатости при испытании материалов втулок цилиндров судовых дизелей на кавитационное изнашивание / Ю.Н. Цветков, Е.О. Гор-

баченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2016. – Вып. 4 (38). – С. 131–137.

62. Третьяков Д.В. Моделирование долговечности цилиндрических втулок двигателя внутреннего сгорания при вибрационной кавитации / Д.В. Третьяков, А.Г. Валишин, О.О. Матвеевский // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 2. – С. 50–60.

63. Берестовицкий Э.Г. Вибрационный метод определения критериев кавитации / Э.Г. Берестовицкий, И.А. Сарафанов // Судостроение. – 2008. – № 4 (779). – С. 32–35.

64. Romero R., Teran L.A., Coronado J.J., Ladino J.A., Rodríguez S.A. Synergy between cavitation and solid particle erosion in an ultrasonic tribometer // Wear.– Volumes 428–429, 15 June 2019.– Pages 395–403

65. Fengjun Chen, Jianhua Du, Shanzi Zhou. Cavitation erosion behaviour of incoloy alloy 865 in NaCl solution using ultrasonic vibration // Journal of Alloys and Compounds.– Volume 83, 15 August 2020.– Article 154783

66. Churchill R.A. Low-heat rejection engine concept review / R. A. Churchill, J. E. Smith, N. N. Clark, R. A. Turton // SAE Technical Paper Series. – 1989.– № 890153. – p. 25–36

67. Franz W Koch. Cooling System Development and Optimization / Franz W Koch, Frank G. Haubner // SAE Technical Paper Series.– 2000.– 2000-01-283.– 15 pp.

68. Жуков В.А. Исследование теплогидравлической эффективности высокотемпературных систем охлаждения судовых дизелей / В.А. Жуков, В.Л. Ерофеев, А.А. Пуляев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2020. – №1(59). – С. 107–114.

69. Разработка стенда для экспериментальных исследований кавитационно акустических явлений / С.С. Хмелёв, В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, Ю.М. Кузовников // Научно-технический вестник Поволжья, 2015, №3, с. 231–234.

70. ASTM G32-16, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org).

## **THE INSTALLATION FOR THE RESEARCH OF CAVITATION PROCESSES IN COOLING SYSTEMS OF MARINE DIESEL ENGINES**

**Oleg K. Bezjukov**

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia*

**Vladimir A. Zhukov**

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia*

**Andrey A. Puljaev**

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia*

*Abstract. The article describes the design of the experimental installation that provides new data on cavitation-erosion failures in high-temperature cooling systems. Based on the analysis of domestic and foreign sources of scientific and technical information concerning the research of cavitation processes, technical objects where cavitation processes take place, factors that affect the intensity of cavitation-corrosion destruction, and methods that are used for cavitation research are identified. A modernized design of the laboratory unit is proposed. The main element of it is a high-frequency magnetostrictive vibrator. Due to the sealed experimental cavity, the unit allows the determining of the intensity of cavitation-erosion destruction at high liquid temperatures and pressure above atmospheric, which is typical for high-temperature cooling of marine diesels. The usage of the installation will allow getting the correct data about the resource of elements of high-temperature cooling systems for marine diesels.*

*Keywords: cavitation, cavitation-erosive destruction, methods of cavitation research, marine diesels, high-temperature cooling, laboratory installation*

**References:**

1. Rozhdestvenskij V.V. Cavitatsija. L.: Sudostroenie.– 1977. – 247 s.
2. Gotman A.Sh. K 200-letiju so dnja rozhdenija Viliama Fruda // Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika. – 2011.– T. 4, № 1. – S. 88-96.
3. R.T. Knapp. Recent investigations of the mechanics of cavitation and cavitation damage // IEEE ASME, 75 (8) (1955), pp. 1045-1054.
4. Knapp R., Daili Dzh., Hammit F. Cavitatsija. M.: Mir. – 1974. – 687 s.
5. F.G. Hammit. Observations on cavitation damage in a flowing system // Trans. ASME J. Basic Eng., 85 (1963), pp. 347-356
6. K. Endo, T. Okada, Y. Baba. Fundamental studies on cavitation erosion // Bull. JSME, 12 (52) (1969), pp. 729-737
7. Levkovskij Yu. L. Struktura cavitatsionnykh techenij. L.: Sudostroenie. – 1978. – 224 s.
8. Ivanov A.N. Gidrodinamika razvitykh cavitatsionnykh techenij. L.: Sudostroenie.– 1980.– 237 s.
9. Zaporozhets E.P., Zibert G.P., Zaporozhets E.E. Gidromekhanicheskaja cavitatsija. M.: IRC Gazprom.– 2003. – 129 s.
10. H. Kato. A consideration on scaling laws of cavitation erosion // Int. Shipbuild. Prog., 22 (253) (1975), pp. 305-327
11. Georgievskaja E.P. Cavitatsionnaja erozija grebnykh vintov i metody bor'by s nej. L.: Sudostroenie.– 1978. – 206 s.
12. Pogodaev L.I. Shevchenko P.A. Gidrobrazivnyj i cavitatsionnyj iznos sudovogo oborudovanija. L.: Sudostroenie. – 1984. – 264 s.
13. Ivanchenko N.N., Skuridin A.A., Nikitin M.D. Cavitatsionnye razrushenija v dizeljah. – L.: Mashinostroenie. – 1970. – 152 s.
14. Gorbachenko E.O., Tsvetkov Yu.N. Prognozirovanie inrubatsionnogo perioda cavitatsionno iznashivaniya lopastej grebnykh vintov s ispol'zovaniem metoda izmerenija profilja poverhnosti. // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. – 2017. – № 52. – S. 87–95.
15. F. Pereira, F. Salvatore, F. Felice. Measurement and modelling of propeller cavitation in uniform inflow // J. Fluids Eng., 126 (2004), pp. 671–679.
16. Yakovlev A.Yu., Koval' A.A. Novyje issledovanija cavitatsii grebnykh vintov // Sudostroenie. – 2010. – № 2 (789). – S. 12-14.
17. Onur Usta, Emin Korkut. Prediction of cavitation development and cavitation erosion on hydrofoils and propellers by Detached Eddy Simulation // Ocean Engineering. – Volume 191 November 2019.– Article 106512
18. Feng Cheng, Weixi Ji, Chenhao Qian, Xu. Jie. Cavitation bubbles dynamics and cavitation erosion in water jet // Results Phys, 9 (2018). – pp. 1585–1593
19. Batuhan Aktas, Onur Usta, Mehmet Atlar. Systematic investigation of coating application methods and soft paint types to detect cavitation erosion on marine propellers // Applied Ocean Research Volume 94 January 2020.– Article 101868
20. Maslov N.A. Analiz neispravnostej plastinchatykh gidromashin putevoj tehniki, vyzvanykh chrezmernym davleniem, aeratziej gidravlicheskogo masla i cavitatsiej // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsh'eniya. 2016. – № 1 (36). – S. 5-15.
21. Stepanov A.M., Fedorov A.L. Sh'elevaja cavitatsija v sudovykh osevykh nasosah // Sudostroenie.– 2001. – № 3 (736). – S. 27-29.
22. Mineev A.V., Kaverzina A.S., Timko A.A. Nekotorye voprosy vlijaniya kavitatsii pri rabote gidroprivodov mashinostrotel'noj tehniki razlichnogo napravlenija, izgotovlenija i sposobov ekspluatatsii // Stroitel'stvo nefljanij i gazovykh skvazhin na sushi i na more. 2015. – № 10. – S. 36-37.
23. Kaverzina A.S. Mineev A.V. Problemy kavitatsii v gidroprivode samohodnykh mashin i sposoby ee snizhenija // Gornyj informacionno-analicheskij bulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). – 2015. – № 6. – S. 171-176.
24. Pogodaev L.I., Kuz'min A.A., Loprev Yu. K. Raschet dolgovechnosti tcilindrovyyh vtuk dizel'nykh dvigatelej pri vibratsionnoj cavitatsii. V knige: Nadezhnost' sudovogo oborudovanija. SPb. – 2015. – S. 44-56.
25. Valishin A.G. Otsenka resursa tsilindrovyyh vtuk DVS pri vibratsionnoj cavitatsii // Dvigatelestroenie.– 2008. – № 1 (235). – S. 20-23.
26. Buldakov A.G., Kraeva E.M. Cavitatsija v nasosah zhidkostnykh raketnykh dvigatelej // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki.– 2012. – T. 1. № 8. – S. 47.

27. Maxwell Brunhart, Celia Soteriou, Christian Daveau, Manolis Gavaises, Mark Winterbourn. Cavitation erosion risk indicators for a thin gap within a diesel fuel pump // *Wear*. – Volumes 442–443, 15 February 2020. – Article 203024.
28. Marco Cristofaro, Wilfried Edelbauer, Phoivos Koukouvinis, Manolis Gavaises. A numerical study on the effect of cavitation erosion in a diesel injector // *Applied Mathematical Modelling*. – Volume 78, February 2020. – Pages 200–216.
29. Abacharaev I.M. Analiticheskij podhod k raschetu ekspluatatsionnoj stojkosti materialov v usloviyah vozdejstvija kavitatsii // *V sb. Fazovye perehody, kriticheskie i nelinejnye javlenija v kondensirovannyh sredah. Sb. Trudov mezhdunarodnoj konferentsii. Rossijskaja akademija nauk Dagestanskij nauchnyj tsentr Institut Fiziki Dagestanskij gos. universite.* – 2005. – S. 208–211.
30. Kulinova G.V. Otsenka intensivnosti obsh'ego i mestnogo gidroabrazivnogo iznashivaniya s uchetom kavitatsii // *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta.* – 2007. – № 4-1 (52). – С. 164–167.
31. Tuzov L.V., Bezjukov O.K., Afanasjeva O.V. Vibratsija sudovyh DVS. SPb.: Izd-vo politehn. unta. – 2012. – 348 c.
32. Ayugin P.N., Ayugin N.P. Kavitatsija i ee vlijaniie na effektivnost' raboty sistemy ohlazhdenija // *V sb. Aktual'nye problemy inzhenerno-tehnicheskogo obespechenija APK. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Kursk. Izd-vo Kurskoj gos. sel'skhoz. Akad. im. Prof. I.I. Ivanova.* – 2013. – S. 77–82.
33. W. H. Xian, D. G. Li, D. R. Chen. Investigation on ultrasonic cavitation erosion of TiMo and TiNb alloys in sulfuric acid solution // *Ultrasonics Sonochemistry.* – Volume 62, April 2020. – Article 104877
34. Haixia Liu, Jinhao Chen, Jie Sun, Can Kang. Influence of the concentration of NaHCO<sub>3</sub> solution on cavitation erosion of copper alloy // *Results in Physics.* – Volume 13, June 2019. – Article 102145
35. Q. N. Song, Y. Tong, N. Xu, S. Y. Sun, Y. X. Qiao. Synergistic effect between cavitation erosion and corrosion for various copper alloys in sulphide-containing 3.5% NaCl solutions // *Wear.* – Volumes 450–451 15 June 2020. – Article 203258
36. Enkang Hao, Xia Liu, Yulong An, Huidi Zhou, Fengyuan Yan. The coupling effect of immersion corrosion and cavitation erosion of NiCoCrAlYTa coatings in artificial seawater // *Corrosion Science* In press, corrected proof Available online 2 April 2020 Article 108635
37. Xiang Ding, Yan Huang, Chengqing Yuan, Zhangxiong Ding. Deposition and cavitation erosion behavior of multimodal WC-10Co4Cr coatings sprayed by HVOF // *Surface and Coatings Technology* Volume 39225 June 2020 Article 125757
38. Marija M. Vuksanović, Nataša Z. Tomić, Maja Gajić-Kvaščev, Veljko R. Djokić, Radmila Jančić Heinemann. The influence of alumina crystal structures on the morphology and surface erosion of PMMA composite materials exposed to cavitation testing // *Wear* Volumes 436–437 15 October 2019 Article 203033
39. Nepomnjash'ij V.A. Vlijanie fizicheskikh svojstv zhidkosti na vzniknovenie i razvitie kavitatsii v gidrosistemah // *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviatsionnoj tehnologicheskoy arademii im. P.A. Solovjeva.* – 2010. – № 1 (16). – S. 33–38.
40. Il-Cho Park, Seong-Jong Kim. Effect of pH of the sulfuric acid bath on cavitation erosion behavior in natural seawater of electroless nickel plating coating // *Applied Surface Science.* – Volume 48331. – July 2019. – Pages 194–204.
41. C.T. Kwok, F.T. Cheng, H.C. Man. Synergistic effect of cavitation erosion and corrosion of various engineering alloys in 3.5% NaCl solution // *Mater Sci Eng, A*, 290 (2000), pp. 145–154
42. Bezjukov O.K., Zhukov V.A. Ohlazhdayush'ie zhidkosti transpotnyh DVS. – SPb.: SPGUVK. – 2009. – 263 s.
43. Bezjukov O.K., Zhukov V.A. Kompleksnaja optimizatsija parametrov ohlazhdenija sudovyh energeticheskikh ustanovok // *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikatsij.* – 2012. – №1. – С. 51–61.
44. Markku Ylönen, Jean-Pierre Franc, Juha Miettinen, Pentti Saarenrinne, Marc Fivel. Shedding frequency in cavitation erosion evolution tracking // *International Journal of Multiphase Flow.* – Volume 118. – September 2019. – Pages 141–149.
45. Tengfei Cai, Yan Pan, Fei Ma Effects of nozzle lip geometry on the cavitation erosion characteristics of self-excited cavitating waterjet // *Experimental Thermal and Fluid Science* Volume 1171. – September 2020. – Article 110137
46. Sosikov V.A., Utkin A.V. Osobennosti kavitatsii zhidkosti vblizi temperatury zamerzaniya // *Deformatsija i razrushenie materialov.* – 2008. № 3. – S. 10–16.

47. Markus Hosbach, Romuald Skoda, Tobias Sander, Uwe Leuteritz, Michael Pfitzner. On the temperature influence on cavitation erosion in micro-channels // *Experimental Thermal and Fluid Science* In press, journal pre-proof Available online.– 11 April 2020.– Article 110140
48. Shaplyko V.V., Krasovskij A.V., Kotuhov A.V., Dezhkunov N.V. Issledovanie vlijaniya temperatury zhidkosti na aktivnost' cavitatsii // V sb. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i proizvodstva. Zapadno-Sibirskij nauchnyj centr, Kuzbasskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet im. T.F. Gorbacheva, Mezhdunarodnyj nauchno-obrazovatel'nyj centr KuzGTU-Arena Multimedia.* – 2014. – S. 145.
49. Li Zhen, Han Jiesheng, Lu Jinjun, Zhou Jiansong, Chen Jianmin. Vibratory cavitation erosion behavior of AISI304 stainless steel in water at elevated temperatures // *Wear*, 321 (2014), pp. 33-37
50. Bezjukov O.K., Zhukov V.A., Puljaev A.A. Vybory parametrov ohlazhdenija sudovyh dizelej // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova.*– 2018. – №2 (48). –S. 379-389.
51. J. Tukker, G. Kuiper. High-speed Video Observations and Erosive Cavitation // 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Germany, Lübeck, August 2004.
52. Jaekwon Jung, Seung-Jae Lee, Jae-Moon Han. Study on Correlation between Cavitation and Pressure Fluctuation Signal Using High-Speed Camera System // *Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation CAV 2009, August 17-22 2009, Ann Arbor, Michigan, USA* ICAV 2009 – Paper № 27.
53. Gusak A.G., Kotenko A.I., German V.F. Issledovanie cavitatsii v svobodnovihrevom nasose metodom vizual'nogo nablyudeniya // *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij.*– 2010. – T. 6. № 7 (48). – S. 7-9.
54. Ivanitskij G.K. Chislennoe modelirovanie dinamiki puzyr'kovogo klastera v protsessah gidrodinamicheskoj cavitatsii // *Sovremennaja nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty,ologii.*– 2011. – № 2 (7). – S. 52-58.
55. Gajnutdinova D.F., Modorskij V.Ja., Kozlova A.V. Vychislitel'noe modelirovanie oblasti vznoveniya cavitatsii pri vibratsijah // *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja.*–2014. – № 6. – S. 127-129.
56. Bubnov M., Tish'enko L., Kovalev A. Izuchenie protsessov cavitatsii i iznashivaniya rabochih koles gidromashin posredstvom reshenij ANSYS // SAPR i grafika. – 2014. – № 9 (215). – S. 56-58.
57. Sedlar M., Soukal J., Kratky T., Vyroubal M. Численное прогнозирование кавитации в энергетических насосах // *Теплоэнергетика.* – 2015. – № 6. – С. 23.
58. F. Schreiner, S. Paepenmüller, R. Skoda. 3D flow simulations and pressure measurements for the evaluation of cavitation dynamics and flow aggressiveness in ultrasonic erosion devices with varying gap widths // *Ultrasonics Sonochemistry* In press, journal pre-proof Available online 31 March.– 2020.– Article 105091.
59. Tsvetkov Yu. N. Gorbachenko E.O., Golitsin V.A. Prognozirovanie cavitatsionnoj iznosostojkosti hromovyh elektroliticheskikh pokrytij po profilu iznosnoy poverhnosti // *Vestnik mashinostroeniya.* – 2019. – № 4. – S. 79–86.
60. Tsvetkov Yu. N. Gorbachenko E.O. Ispytanie stalej na cavitatsionnoe iznashivanie s primeneniem metoda izmereniya profilya poverhnosti // *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov.* – 2017. – T. 83. – № 7. – С. 54–58.
61. Tsvetkov Yu. N. Gorbachenko E.O. Primenenie metoda izmereniya sherohovatosti pri ispytanii materialov vtulok tsilindrov sudovyh dizelej na cavitatsionnoe iznashivanie // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova.* – 2016. – Vyp. 4 (38). – S. 131–137.
62. Tret'jakov D.V., Valishin A.G., Matveevskij O.O. Modelirovanie dolgovechnosti tsilindrovyyh vtulok dvigatelej vnutrennego sgoraniya pri vibratsionnoj cavitatsii // *Problemy mashinostroeniya i nadezhnost' mashin.* – 2008. – № 2. – С. 50-60.
63. Berestovitskij E.G., Sarafanov I.A. Vibratsionnyj metod opredeleniya kriteriev cavitatsii // *Sudostroenie.* – 2008. – № 4 (779). – S. 32-35
64. R. Romero, L. A. Teran, J. J. Coronado, J. A. Ladino, S. A. Rodríguez. Synergy between cavitation and solid particle erosion in an ultrasonic tribometer // *Wear.*– Volumes 428–429, 15 June 2019.– Pages 395-403
65. Fengjun Chen, Jianhua Du, Shanzi Zhou. Cavitation erosion behaviour of incoloy alloy 865 in NaCl solution using ultrasonic vibration // *Journal of Alloys and Compounds.*– Volume 83, 15 August 2020.– Article 154783
66. Churchill R.A. Low-heat rejection engine concept review / R. A. Churchill, J. E. Smith, N. N. Clarc, R. A. Turton // *SAE Technical Paper Series.* – 1989.– № 890153. – p. 25-36

67. Franz W Koch. Cooling System Development and Optimization / Franz W Koch, Frank G. Haubner // SAE Technical Paper Series.– 2000.– 2000-01-283.– 15 pp.
68. Zhukov V.A., Erofeev V.L., Puljaev A.A. Issledovanie teplogidravlicheskoj effektivnosti vysokotemperaturnyh system ohlazhdenija sudovyh diselej // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova. – 2020. – №1(59). – S. 107-114.
69. Khmelev S.S., Khmelev V.N., Golyh R.N., Kuzovnikov Yu. M. Razrabotka stenda dlja eksperimental'nyh issledovanij cavitatsionno-akusticheskikh javlenij // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. – 2015, №3. – S. 231-234.
70. ASTM G32-16, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org).

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Безюков Олег Константинович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры теории и конструкции судовых ДВС (ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова)  
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: okb-nayka@yandex.ru

**Oleg K. Bezjukov**, doctor of technical sciences, Professor of the Department of theory and design of marine internal combustion engines, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035,

**Жуков Владимир Анатольевич**, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой теории и конструкции судовых ДВС (ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова)  
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: va\_zhukov@rambler.ru

**Vladimir A. Zyukov**, doctor of technical sciences, Head of the Department of theory and design of marine internal combustion engines, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035,

**Пуляев Андрей Араратович**, аспирант кафедры теории и конструкции судовых ДВС (ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова)  
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: kaf\_sdvs@gumrf.ru

**Andrej A. Puljaev**, postgraduate of the Department of theory and design of marine internal combustion engines, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035

Статья поступила в редакцию 30.07.2020 г.

**Научные проблемы  
водного транспорта**

**Вестник ВГАВТ**

**Выпуск 64**  
2020

Формат бумаги 70x180 1/16. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 15,56. Уч.-изд. л. 21,79.  
Заказ 087. Тираж 500.

Отпечатано в типографии издательско-полиграфического комплекса ВГУВТ  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Свободная цена

Подписной индекс в каталоге  
Агентства "Книга-Сервис"  
70191

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)  
Свидетельство ПИ № ФС77-77658 от 17 января 2020 г.

*Адрес редакции и издателя:  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5*

*Управление научных исследований  
и инновационной деятельности  
© ВГУВТ, 30.09.2020*