

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

Научные проблемы водного транспорта № 62 2020



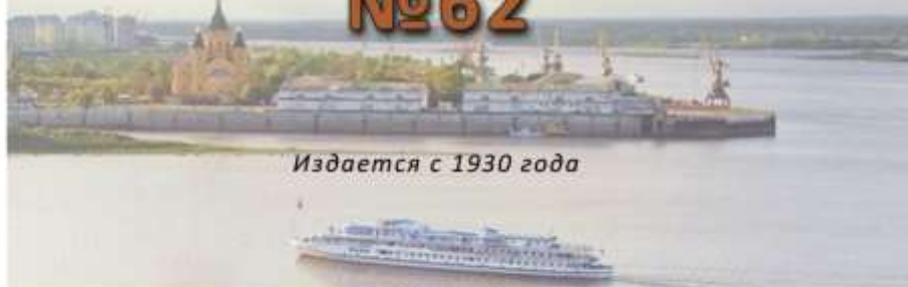
ISSN 2713-1858



Вестник ВГАВТ

**№62**

*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 62***

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

УДК 33+55+62+65+72

В 38

В 38 Научные проблемы водного транспорта. Выпуск 62. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – 184 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.
Гаврилов А.И.	д.э.н., проф.	Вычужанин В.В.	д.т.н., проф.
Грамузов Е.М.	д.т.н., проф.	Гирин С.Н.	к.т.н., проф.
Зуев В.А.	д.т.н., проф.	Ермаков С.А.	д.ф.-м.н., проф.
Казakov Н.Н.	к.т.н., доц.	Иванов В.М.	к.т.н., проф.
Корнилов Д.А.	д.э.н., проф.	Клементьев А.Н.	д.т.н., проф.
Костров В.Н.	д.э.н., проф.	Королев Ю.Ю.	к.э.н., доц.
Мареев Е.А.	д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН	Лаврентьева Е.А.	д.э.н., проф.
Мордовченков Н.В.	д.э.н., проф.	Матвеев Ю.И.	д.т.н., проф.
Никущенко Д.В.	д.т.н., проф.	Мясников Е.Н.	д.ф.-м.н., проф.
Плющаев В.И.	д.т.н., проф.	Озина А.М.	д.э.н., проф.
Ситнов А.Н.	д.т.н., проф.	Роннов Е.П.	д.т.н., проф.
Удалов О.Ф.	д.э.н., проф.	Степанов А.Л.	д.т.н., проф.
Уртминцев Ю.Н.	д.т.н., проф.	Уметалиев А.С.	д.э.н., проф.
Франк Венде	к.т.н., проф.	Федосенко Ю.С.	д.т.н., проф.
Цветков Ю.Н.	д.т.н., проф.	Хватов О.С.	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**

### **Водные пути, порты и гидротехнические сооружения**

*Ермошкин А.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Поплавский Е.И.*

Макет системы экологического мониторинга пленочных загрязнений в акватории Горьковского водохранилища ..... 11

*Сикарев С.Н., Адамов Е.И., Смирнов С.Г., Липатов И.В., Людмилини М.М.*

Математическая модель поведения воздушных потоков на территории открытых угольных складов ..... 20

## **Раздел II**

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

*Бугаев В.Г., Тунг Д.В., Домашевская Я.Р., Хиен Ф.Ч.*

Численное моделирование гидродинамических характеристик винто-рулевого комплекса и поворотливости рыболовного судна ..... 29

*Гуляев И.А., Роннов Е.П.*

Классификация и архитектурно-конструктивные особенности комбинированных судов ..... 40

*Лучков А.Н., Чебан Е.Ю., Журавлев Е.В.*

Метод расчета коэффициента подъемной силы составного крыла экраноплана при полете у поверхности земли ..... 51

*Любимов В.И., Варакосов Ю.Г., Барышев В.И.*

Технико-эксплуатационные аспекты использования скоростных судов в транспортно-эксплуатационной системе российской федерации ..... 62

*Румянцев Э.Г., Роннов Е.П.*

Определение элементов и характеристик речных землесосных снарядов на начальных стадиях проектирования ..... 71

*Рыченкова А.Ю., Клименко Е.С., Бородин Л.Н.*

Геометрическое моделирование и оценка качества каркасной поверхности корпуса судна в САПР Компас-3D ..... 81

*Цветков Ю.Н., Горбаченко Е.О., Ларин Р.Н.*

Влияние коррозионного фактора на кавитационную износостойкость сплавов для гребных винтов ..... 91

### **Раздел III**

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

*Кегенбеков Ж.К., Джаксон И.В.*

Управление ресурсами предприятия на основе логистических концепций ..... 103

*Королев Ю.Ю.*

Итоги Doing Business'2020: проблемы и перспективы совершенствования экономико-правового института несостоятельности (банкротства)..... 111

*Маркова Н.А.*

Комплекс мероприятий по управлению оборотным капиталом компании ..... 123

### **Раздел IV**

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

*Агеев С.О.*

Обоснование целесообразности суточного регулирования стока низконапорным гидроузлом ..... 135

*Клементьев А.Н., Чурин М.Ю., Зубкова Е.В.*

Динамическая просадка толкаемых составов и особенности её определения ..... 145

### **Раздел V**

#### **Эксплуатация судового энергетического оборудования**

*Горлова Н.Н.*

Использование каталитической нейтрализации для очистки отработавших газов судовых энергетических установок в условиях агрессивной среды ..... 157

*Медведев Г.В., Храмов М.Ю.*

Воздействие температуры отработавших газов судовых энергетических установок на качество их очистки с использованием метода каталитической нейтрализации ..... 167

*Федоровский К.Ю., Федоровская Н.К.*

Оптимизация температур двухконтурной замкнутой системы охлаждения судовой энергетической установки ..... 175

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

**RUSSIAN JOURNAL  
OF WATER TRANSPORT**

***Issue 62***

VSUWT publishing house  
N. Novgorod, 2020

Russian Journal of Water Transport. Iss. 62. – N.Novgorod: VSUWT publishing house, 2020. – 184 p.

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.
Gavrilov A.I.	Ph.D.(Econ.), Professor	Vychuzhanin V.V.	D.Sc.(Tech.), Professor
Gramuzov E.M.	D.Sc.(Tech.), Professor	Girin S.N.	Ph.D. Associate Professor
Zuev V.A.	D.Sc.(Tech.), Professor	Ermakov S.A.	D.Sc.(Phys.&Math.), Prof.
Kazakov N.N.	Ph.D. Associate Professor	Ivanov V.M.	Ph.D. Associate Professor
Kornilov D.A.	Ph.D.(Econ.), Professor	Klement'ev A.N.	D.Sc.(Tech.), Professor
Kostrov V.N.	D.Sc.(Econ.), Professor	Korolev Y.Y.	Ph.D. Associate Professor
Mareev E.A.	D.Sc.(Phys.&Math.), Prof.	Lavrentieva E.A.	Ph.D.(Econ.), Professor
Mordovchenkov N.V.	D.Sc.(Econ.), Professor	Matveev Y.I.	D.Sc.(Tech.), Professor
Nikushenko D.V.	D.Sc.(Tech.), Professor	Myasnikov E.N.	D.Sc.(Phys.&Math.), Prof.
Plushaev V.I.	D.Sc.(Tech.), Professor	Ozina A.M.	Ph.D.(Econ.), Professor
Sitnov A.N.	D.Sc.(Tech.), Professor	Ronnov E.P.	D.Sc.(Tech.), Professor
Udalov O.F.	Ph.D.(Econ.), Professor	Stepanov A.L.	D.Sc.(Tech.), Professor
Urtmintsev Y.N.	D.Sc.(Tech.), Professor	Umetaliev A.S.	Ph.D.(Econ.), Professor
Frank Vende	Ph.D. Associate Professor	Fedosenko Y.S.	D.Sc.(Tech.), Professor
Tsvetkov Yu.N.	D.Sc.(Tech.), Professor	Khvatov O.S.	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.  
Honored Worker of Science and Technology of the R.F., Honored Worker of Transport of Russia  
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  
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**

### **Waterways, ports and hydraulic engineering constructions**

- Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Poplavsky E.I., Rusakov N.S.*  
Model of system of ecological monitoring of film pollutions in the Gorkovsky reservoir ..... 11
- Sikarev S.N., Adamov E.I., Smirnov S.G., Lipatov I.V., Lyudmilin M.M.*  
Development of a mathematical model of behavior of air flows in the territory of open port coal warehouses ..... 20

## **Section II**

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

- Bugaev V.G., Tung D.V., Domashevskaya Y.R., Hiep P.T.*  
The numerical modelling of hydrodynamic characteristics of the propeller-rudder system and turning capacity of the fishing vessel ..... 29
- Gulyaev I.A., Ronnov E.P.*  
Classification and design features of combined ships ..... 40
- Luchkov A.N., Cheban E.Yu., Zhuravlev E.V.*  
Method of calculating the lift coefficient for a wing's compound wing flying close to the ground ..... 51
- Lyubimov V.I., Varakosov Y.G., Baryshev V.I.*  
Technical and operational aspects of the high-speed vessels use in the Russian Federation transport system ..... 62
- Rumyantsev E.G., Ronnov E.P.*  
Determination of elements and characteristics of river suction dredgers at initial design stages ..... 71
- Rychenkova A.Yu., Klimenko E.S., Borodina L.N.*  
Geometric modeling and quality assessment of the hull frame surface in Compass-3D CAD ..... 81
- Tsvetkov Y.N., Gorbachenko E.O., Larin R.N.*  
Influence of the corrosion factor on the cavitation wear resistance of alloys for ship propellers ..... 91

### **Section III**

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

<b>Kegenbekov Z.K., Jakson I.V.</b> Enterprise resource management based on logistics concepts .....	103
<b>Korolev Y.Y.</b> Doing Business'2020 results: Problems and perspectives of improvement of the economic and legal institute of insolvency (bankruptcy) .....	111
<b>Markova N.A.</b> Complex of measures for managing the company's working capital .....	123

### **Section IV**

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

<b>Ageev S.O.</b> Drain regulation of low-headed hydraulic unit .....	135
<b>Klement'ev A.N., Churin M.Y., Zubkova E.V.</b> Pushing vessels dynamic squat and peculiarities of its calculation.....	145

### **Section V**

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

<b>Gorlova N.N.</b> The use of catalytic neutralization for the purification of exhaust gases from marine power plants in an aggressive environment .....	157
<b>Medvedev G.V., Khramov M.Y.</b> The effect of marine power plants exhaust gases temperature on the quality of their cleaning using the catalytic neutralization method .....	167
<b>Fedorovskiy K.Yu., Fedorovskaya N.K.</b> Temperatures optimization of two-circuit closed cooling system of ship's power plant ....	175

# **Раздел I**

***Водные пути, порты  
и гидротехнические сооружения***



# **Section I**

***Waterways, ports and hydraulic  
engineering constructions***



УДК 556.06

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.35>

## **МАКЕТ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПЛЕНОЧНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В АКВАТОРИИ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

**А.В. Ермошкин**

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

**И.А. Капустин**

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

**А.А. Мольков**

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

**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 рассмотрен вопрос создания системы экологического мониторинга пленочных загрязнений в акватории Горьковского водохранилища. Предложено совмещение известного модельного подхода для расчетов траекторий дрейфа пассивных частиц на морской поверхности с данными дистанционного радиолокационного зондирования в сверхвысокочастотном диапазоне, которые обеспечивают первичное обнаружение разлива загрязняющих веществ на рассматриваемой акватории. В качестве дистанционной составляющей системы выступала цифровая когерентная радиолокационная станция X-диапазона. Модельная составляющая системы опирается на результаты ранее проведенных работ в части измерения скоростей течений в исследуемой акватории и физического описания дрейфа пленочного загрязнения. В результате проведенных комплексных натурных исследований продемонстрирована работоспособность разработанной системы для обнаружения и прогноза дальнейшего распространения пленочного загрязнения в акватории Горьковского водохранилища.*

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

### **Введение**

Задача экологического мониторинга внутренних водных путей в последние годы становится весьма актуальной, что связано с обращением особого внимания на проблемы антропогенного загрязнения и на программы оздоровления рек России [1]. Одним из наиболее распространенных типов загрязнения можно назвать разливы нефтепродуктов при сбросе с судов, при их перегрузке и транспортировании на внутренних водных путях [2]. При попадании нефтепродуктов в водную среду на поверхности воды образуется пленка данного вещества. Исследование процессов распространения пленочных загрязнений на поверхности водоемов представляет интерес для обеспечения экологической безопасности районов интенсивного судоходства, в первую очередь – прибрежных акваторий морей и внутренних водных путей [3, 4, 5]. Диагностика загрязнения на ранних стадиях и его оперативный мониторинг позволяют существенно сократить затраты на ликвидацию последствий разлива и уменьшить экологические риски [6, 7]. Определение состава и толщины пленки загрязняющего веще-

ства преимущественно осуществляется с помощью контактных методов, однако обнаружение факта загрязнения, оценка площади разлива вещества и параметров его движения возможны и с помощью методов дистанционного зондирования [8]. Преимуществами среди других дистанционных приборов для решения данной задачи обладает радиолокатор кругового обзора, работающий в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Благодаря высокому пространственному и временному разрешению радиолокационных панорам водной поверхности удастся диагностировать пленочное загрязнение на ранних стадиях и отследить его эволюцию [9]. Детектирование загрязняющих пленок с помощью навигационных радиолокационных станций (РЛС) в последнее время занимает важное место в экологическом мониторинге деятельности нефтедобывающих морских платформ. Такие известные коммерческие системы, как MIROS, sigmaS6, SedarQ успешно выполняют задачу обнаружения нефтяных загрязнений в морских условиях [10, 11, 12]. Известно, что нефтесодержащие пленки становятся видимыми на радиолокационных изображениях морской поверхности, получаемых в СВЧ-диапазоне благодаря гашению ими определенного участка спектра ветровых волн. Существуют модели, позволяющие оценивать радиолокационные контрасты для различных веществ [13, 14].

Исследование динамики пленок ПАВ представляет большой интерес, связанный с необходимостью обнаружения загрязнений на морской поверхности (например, нефтяных разливов), прогнозированием вероятных сценариев дальнейшего развития аварийной ситуации и необходимостью идентификации вещества загрязнителя. Однако область уверенного обнаружения пленочного загрязнения с помощью СВЧ-радиолокаторов невысока и для самых благоприятных условий ограничена дальностью в 1 км, что является приемлемым для рек, но для акваторий водохранилищ недостаточна. В то же время известно, что разливы нефтепродуктов чаще всего происходят в районах бункеровки или длительной стоянки судов, которые могут быть освещены с помощью такого радиолокатора и при появлении загрязнения на водной поверхности оно будет обнаружено. Дальнейшая динамика пленочного загрязнения может быть рассчитана на основе численного моделирования. Для построения прогностических моделей дрейфа пленочного загрязнения могут привлекаться различные физические модели, учитывающие совместное влияние приводного слоя атмосферы и водной толщи. К известным программным продуктам, проводящим расчет дрейфа пленочного загрязнения на морской поверхности можно отнести GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) [15], STW (SeatrackWeb) [16] и другие. Общей особенностью всех моделей является необходимость привлечения дополнительной информации об интересующей акватории, основной из которой является скорость течения. Внутренние водоемы и прибрежные зоны морей обладают рядом особенностей, отличающих данные акватории от открытого океана. В первую очередь, это ограниченные разгоны ветрового волнения и небольшая глубина. В работе [17] на основе натуральных данных была проведена оценка вклада приводного ветра в кинематику сликов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения. Было показано, что скорость и направление дрейфа центра масс пленочного загрязнения хорошо описываются векторной суммой скорости течения водной толщи и 3% скорости приводного ветра, в том числе, в условиях ограниченных разгонов волнения [18]. В настоящей работе с использованием результатов [17] проведено численное моделирование распространения пленочных загрязнений в акваториях внутренних водоемов при наличии информации о скорости течения.

### 1. Радиолокационная составляющая

Как следует из введения, для экологического мониторинга протяженной акватории, к которой относится Горьковское водохранилище, необходимо привлечение инструментальной и модельной составляющих. Наиболее эффективным всепогодным средством дистанционного обнаружения пленочного загрязнения на поверхности во-

доема является радиолокатор СВЧ диапазона. В данной системе экологического мониторинга использовалась цифровая когерентная РЛС MRS-1000, работающая в X-диапазоне длин радиоволн производства НПО «Микран» г. Томск. Параметры радиолокатора приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Параметры радиолокатора**

Характеристика	MRS-1000
Мощность излучения	1 Вт
Несущая частота (длина волны)	9,4 ГГц (3,2 см)
Дальность	до 3000 м
Ширина ДНА в ГП/ВП	1° / 30°
Режим работы	ЛЧМ( $f_m=191,2$ МГц)
Поляризация	Горизонтальная
Период повторения	3,5 мс
Разрешение по пеленгу	0,5°
Разрешение по дальности	0,79 м
Период обзора пространства	2,5 с – 16 с

РЛС устанавливалась на крыше маяка на конце мола аванпорта Горьковского водохранилища (рис. 1). Такое место установки является наиболее удачным и позволяет проводить обзор обширной акватории, по которой проходит внутренний водный путь и находится место якорной стоянки судов, ожидающих проход шлюзов. Дополнительно на крыше устанавливалась метеостанция для измерения скорости и направления ветра.



Рис. 1. Место установки радиолокатора на Горьковском водохранилище

Пример радиолокационной панорамы водной поверхности, на которой присутствует пленочное загрязнение, приведен на рис. 2. На изображении хорошо различимы молы аванпорта и береговая линия. Область, занятая пленочным загрязнением на изображении выглядит как локальное понижение уровня сигнала с резкими границами. На временной серии радиолокационных панорам область загрязнения смещается, что может являться еще одним признаком для его автоматического распознавания.

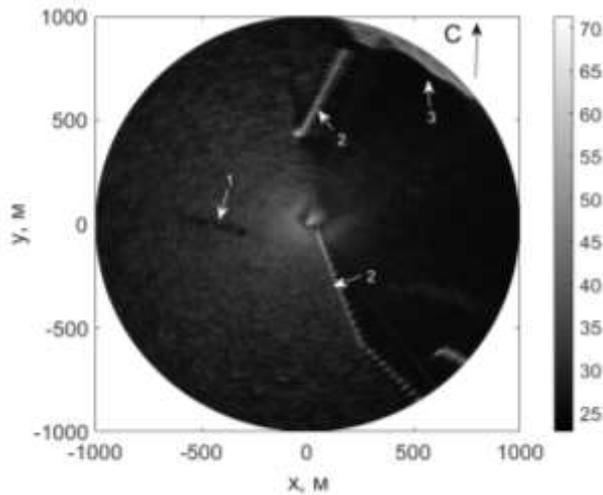


Рис. 2. Радиолокационная панорама с пленочным загрязнением на Горьковском водохранилище: 1 – пленочное загрязнение, 2 – молы аванпорта, 3 – берег, радиолокатор установлен в центре координат.

## 2. Модельная составляющая

В работе [19] приведены результаты многолетних измерений глубины озерной части Горьковского водохранилища, а также результаты измерений структуры течений при различных среднесуточных расходах через Нижегородскую ГЭС. На основе этих данных была разработана программа для моделирования дрейфа пленочного загрязнения в акватории Горьковского водохранилища в среде Matlab. В программе задается расчетная сетка  $(x, y)$ , границы акватории  $(Xb, Yb)$ , начальные координаты точки разлива  $(X0, Y0)$ , компоненты скорости ветра  $(uw, vw)$ , интерполированные на равномерное сетку компоненты скорости течения  $(uc(x,y), vc(x,y))$  из работы [19] и структура глубины водохранилища  $h(x,y)$ . Решение системы уравнений (1) на расчетной сетке производится методом Эйлера:

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = u_c(x, y) + 0,03 \cdot u_w(x, y) \\ \frac{\partial y}{\partial t} = v_c(x, y) + 0,03 \cdot v_w(x, y) \end{cases} \quad 1)$$

В результате моделирования выводятся координаты центра тяжести пленочного загрязнения в заданный момент времени на картографической основе Горьковского водохранилища. На рис. 3 приведены примеры моделирования распространения пленочного загрязнения, на которых представлены траектории движения центра масс пятна загрязнителя до достижения им береговой линии. Для случая южного ветра 5 м/с (рис. 3 слева) рассчитаны траектории дрейфа загрязнения из трех точек: на плотине, западнее и в районе г. Пучеж. Видно отклонение траекторий движения от линейной под действием течения водной толщи. На рис. 3 справа представлены результаты моделирования, при котором загрязнение проходит через всю акваторию Горьковского водохранилища, что реализуется при северо-северо-западном ветре 5 м/с. Стоит отметить, что существует возможность задания переменного во времени ветра, что существенным образом повлияет на траекторию распространения загрязнения. С помощью операции обращения времени в модели можно также вычислить местоположение предполагаемого источника загрязнения.

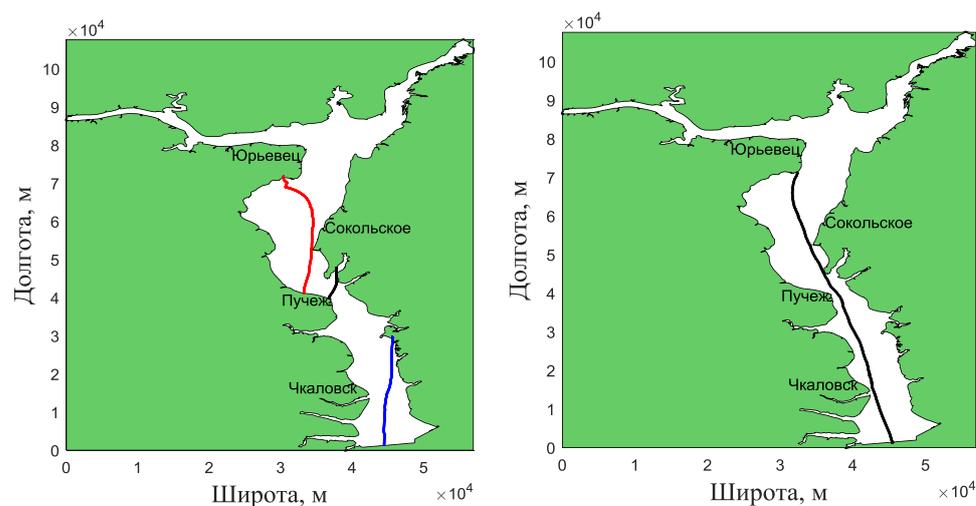


Рис. 3. Моделирование траектории центра масс пленочного загрязнения в акватории Горьковского водохранилища (слева) для случая южного ветра 5 м/с, (справа) для случая северо-северо-западного ветра 5 м/с.

### 3. Результаты работы системы

Проверка результатов работы системы опирается на анализ материалов комплексных натуральных исследований растекания пленочных загрязнений. Эксперименты проводились на Горьковском водохранилище в 2018 и 2019 годах с использованием цифровой когерентной РЛС MRS-1000. Метеорологическая обстановка фиксировалась при помощи метеостанции VantagePro 2 Davis Instruments, скорость и направления течения в приповерхностном слое восстанавливалась по данным акустического доплеровского профилографа ADCP WorkHorse Sentinel 600 kHz. Разлив поверхностно-активного вещества, которым являлся спиртовой раствор олеиновой кислоты (OLE) или растительное масло (OIL), осуществлялся на расстоянии до 1 км от места установки РЛС с плавучей лаборатории ИПФ РАН «Геофизик». В ходе экспериментов были одновременно получены энергетические и скоростные характеристики рассеяния СВЧ радиоволн водной поверхностью в присутствии пленки ПАВ в X-диапазоне, и проведены синхронные измерения двумерного спектра волнения, скорости и направления течения, скорости и направления приводного ветра, температуры воды и воздуха.

Примеры динамики пленочных slicks при разных скоростях и направлениях ветра для двух экспериментов приведены на рис. 4. Контуры пятна ПАВ были определены по данным радиолокационной съемки водной поверхности.

В результате анализа экспериментальных данных было показано, что растекание пятна ПАВ происходит несимметрично, формируется вытягивание пятна вдоль направления ветра, кроме того, динамика движения слика определяется совокупностью влияния приповерхностного течения и ветрового дрейфа, составляющей порядка 3% от величины скорости ветра. Полученный результат находится в хорошем согласии с ранее проведенными исследованиями [17]. На рис. 5 представлен результат сопоставления траектории дрейфа пленочного загрязнения зафиксированной с помощью радиолокатора (красные символы) с рассчитанной с помощью модельной составляющей системы (черные символы). В качестве начальных данных в модели выступали первоначальное местоположение пятна и измеренная скорость ветра и течения, сумма вектора течения и 3% скорости ветра приведена синими стрелками на рис. 4 и на рис. 5. Наблюдается хорошее воспроизведение положения центра масс пленочного загрязнения моделью.

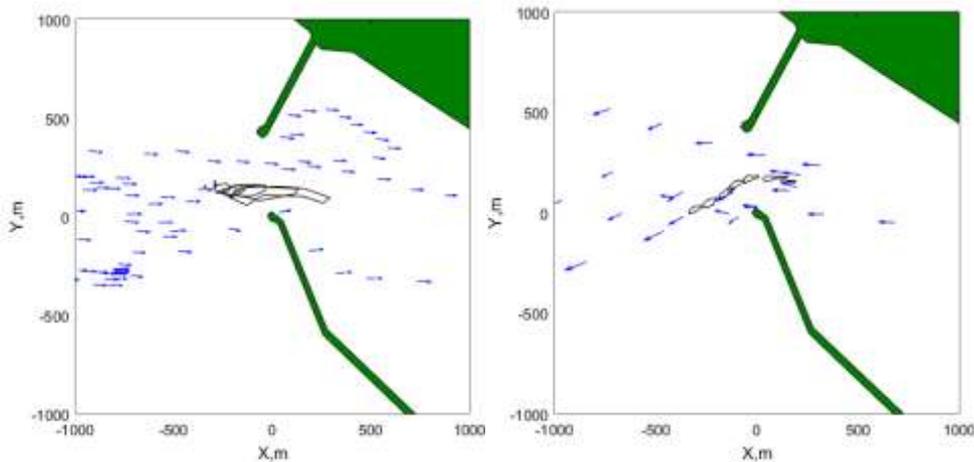


Рис. 4. Динамика слика в акватории Горьковского водохранилища в экспериментах 29.05.2018 (слева) и 23.07.2018 (справа). Стрелками показана сумма вектора течения и 3% скорости ветра, положение слика OIL (слева) и OLE (справа) в разные моменты времени показаны черными контурами

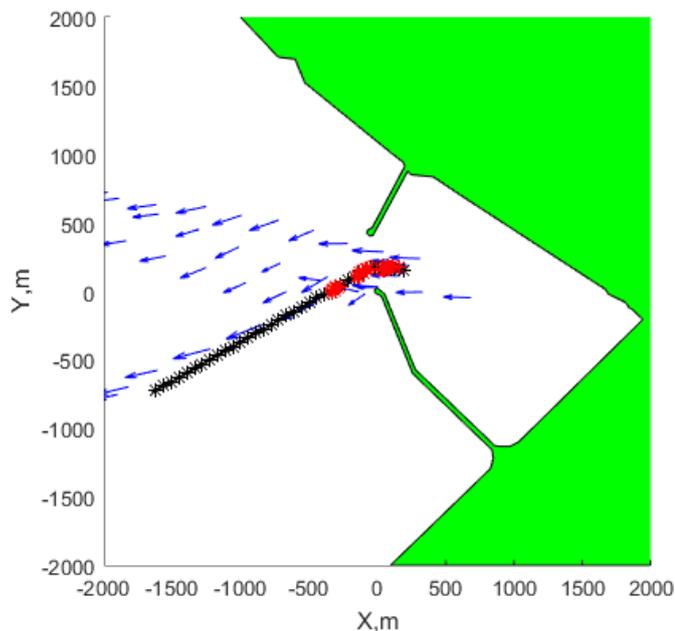


Рис. 5. Результаты сопоставления моделирования траектории центра масс пленочного загрязнения в акватории Горьковского водохранилища (черные символы) с наблюдаемым в эксперименте дрейфом модельного загрязняющего пятна (красные символы)

### Заключение

В настоящей статье представлена разработанная система для экологического мониторинга пленочных загрязнений в акватории Горьковского водохранилища для определения последствий разлива и минимизации возможного ущерба. Система включает в себя радиолокационную и модельную компоненты, которые дополняют

друг друга. Обнаружение факта загрязнения осуществляется с помощью радиолокатора, устанавливаемого для обзора наиболее опасных с точки зрения загрязнений областей акватории. Местоположение загрязнения и скорость ветра в момент обнаружения являются начальными данными для расчета его траектории при дальнейшем распространении с помощью модельной составляющей системы. Следует отметить, что с помощью предложенной модели можно проводить расчеты разных сценариев развития событий в зависимости от задаваемой скорости и направления ветра.

*Благодарности.* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-45-520018 р\_а и РГО (проект № 02/2019-Р).

#### **Список литературы:**

1. Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов. Москва: Студия Ф1, 2019. – 572 с.
2. Чебан Е.Ю., Капустин И.А., Мольков А.А., Игонина М.В. Моделирование процесса растекания нефти при выполнении судами в счалах погрузо-разгрузочных операций (ПРО). Речной транспорт (XXI век). 2015. – № 5 (76) – с. 42–47.
3. Журбас В.М. Основные особенности распространения нефти в море. Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа, М.: ВИНТИ. 1978. т. 12. с. 144–159
4. Коротаев Г.К., Кровотынцев В.А.. Интегральная модель динамики нефтяного разлива.
5. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 376 с.
6. Этин В.Л., Чебан Е.Ю., Иванов В.М., Васькин С.В., Лукина Е.А., Сосенков Ф.С. Организация борьбы с разливами нефти на внутренних водных путях. монография /– Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. – 284 с.
7. Чебан Е.Ю., Иванов В.М., Кузьмичев А.И. Технико-экономическая оценка реализации положения о функциональной подсистеме организации работ по предупреждению и ликвидации разливов нефти на внутренних водных путях России. 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.
8. Fingas M., Brown C.E. A review of oil spill remote sensing // Sensors. 2018. Vol. 18. № 1. P. 91.
9. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н.Новгород: ИПФ РАН. 2010. 164 с.
10. Measuring the Ocean Surface, Available at: <https://www.miros-group.com>
11. Sigma S6 Oil Spill Detection (OSD) System, Available at: <http://rutter.ca/sigma-s6>
12. The SeaDarQ radar system, Available at: <http://www.seadarq.com>
13. Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Гушин Л.А. Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 86–98.
14. Кудрявцев В.Н., Иванова Н.А., Гушин Л.А., Ермаков С.А. Оценка контрастов спектра ветровых волн в снимках, вызванных биогенными и нефтяными пленками: Препринт №. 765. ИПФРАН, Нижний Новгород, 2008. 34 с.
15. General NOAA Operational Modeling Environment, Available at: <https://gnome.orr.noaa.gov/>
16. SeatrackWeb, Available at: <http://www.helcom.fi/action-areas/response-to-spills/helcom-seatrackweb-and-oil-drift-modeling/>
17. Капустин И.А., Ермошкин А.В., Богатов Н.А., Мольков А.А. Об оценке вклада приводного ветра в кинематику сликов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 163–172.
18. Wu J. Wind-induced drift currents // J. FluidMech. 1975. Vol. 68. Issue 1. P. 49–70.
19. Капустин И.А., Мольков А.А. Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохранилища. Метеорология и Гидрология. 2019. №7. С. 110–117.

## **MODEL OF SYSTEM OF ECOLOGICAL MONITORING OF FILM POLLUTIONS IN THE GORKOVSKY RESERVOIR**

**Alexey V. Ermoshkin**

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

**Ivan A. Kapustin**

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

**Alexandr A. Molkov**

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

**Evgeny I. Poplavsky**

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

**Nikita S. Rusakov**

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

*Abstract. The article considers the issue of creating a system of environmental monitoring of film pollutions in the Gorky reservoir. A combination of the well-known model approach for calculating the drift trajectories of passive particles on the sea surface with the data of remote sensing, which provide primary detection of a spill of pollutants in the scanned area, is proposed. X-band digital coherent radar was the source of remote data. The model component of the system is based on the results of measurements of current velocities and the physical dependence of the slick drift. As a result of comprehensive studies, the developed system has demonstrated operability for detecting and predicting the spread of film pollution in the Gorky reservoir.*

*Keywords: film slick, surfactants, radar, remote sensing, modeling, monitoring*

**References:**

1. Nauchnye problemy ozdorovleniya rossiyskikh rek i puti ikh resheniya. Sbornik nauchnykh trudov. Moscow: Studiya F1, 2019. – 572 p.
2. Cheban E.Yu., Kapustin I.A., Molkov A.A., Igonina M.V. Modelirovanie protsessa rastekaniya nefi pri vypolnenii sudami v schalakh pogruzo-razgruzochnykh operatsiy (PRO). Rechnoy transport .2015. – № 5 (76) – p. 42–47.
3. Zhurbas V. M. Osnovnye osobennosti rasprostraneniya nefi v more. Itogi nauki i tekhniki. Mekhanika zhidkosti i gaza, M.: VINITI.1978. Vol. 12. p. 144–159
4. G.K. Korotaev, V.A. Krovotyntsev. Integral'naya model' dinamiki neftyanogo razliva.
5. Monin A.S., Krasitskiy V.P. Yavleniya na poverkhnosti okeana. L.: Gidrometeoizdat. 1985. 376 p.
6. Etin V.L., Cheban E.Yu., Ivanov V.M., Vas'kin S.V., Lukina E.A., Sosonkov F.S. Organizatsiya bor'by s razlivami nefi na vnutrennikh vodnykh putyakh. Monografiya N. Novgorod: Izd-vo FGBOUVO «VGUVT», 2015. – 284 p.
7. Cheban E.Yu., Ivanov V.M., Kuz'michev A.I. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka realizatsii polozeniya o funktsional'noy podsysteme organizatsii rabot po preduprezhdeniyu i likvidatsii razlivov nefi na vnutrennikh vodnykh putyakh Rossii. V sbornike: Problemy ispol'zovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek. Trudy mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma. Materialy nauchno-metodicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, spetsialistov i studentov. VGBOU VO NNGASU, FGBOU VO «VGUVT». 2017. p. 17.
8. Fingas M., Brown C.E. A review of oil spill remote sensing // Sensors. 2018. Vol. 18. №. 1. P. 91.
9. Ermakov S.A. Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln. N. Novgorod: IPFRAN. 2010. 164 p.
10. Measuring the Ocean Surface. <https://www.miros-group.com>
11. Sigma S6 Oil Spill Detection (OSD) System. <http://rutter.ca/sigma-s6>
12. The SeaDarQ radar system. <http://www.seadarq.com>
13. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Gushchin L.A. Plenki na morskoy poverkhnosti i ikh distantsionnoe zondirovanie. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2006. Vyp. 3. Vol. 2. P. 86–98.
14. Kudryavtsev V.N., Ivanova N.A., Gushchin L.A., Ermakov S.A. Otsenka kontrastov spektra vetrovykh voln v slikakh, vyzvannykh biogennymi i neftyanymi plenkami: Preprint №. 765. IPFRAN, Nizhny Novgorod, 2008. 34 p.
15. General NOAA Operational Modeling Environment. <https://gnome.orr.noaa.gov/>

16. SeatrackWeb. <http://www.helcom.fi/action-areas/response-to-spills/helcom-seatrackweb-and-oil-drift-modeling/>

17. Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Mol'kov A.A. Ob otsenke vklada privodnogo vetra v kinematiku slikov na morskoy poverkhnosti v usloviyakh ogranichennykh razgonov volneniya. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. Vol. 16. № 2. P. 163–172.

18. Wu J. Wind-induced drift currents // J. Fluid Mech. 1975. Vol. 68. Issue 1. P. 49–70.

19. Kapustin I.A., Mol'kov A.A. Struktura techeniy i glubiny v ozernoy chasti Gor'kovskogo vodokhranilishcha. Meteorologiya i Gidrologiya. 2019. №7. P. 110–117.

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

**Алексей Валерьевич Ермошкин**, к.ф.-м. научный сотрудник, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)  
603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46,  
e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

**Иван Алесандрович Капустин**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН),  
603950, г. Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, e-mail: kapustin-i@yandex.ru

**Александр Андреевич Мольков**, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН),  
603950, г. Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46, e-mail: wave3d@mail.ru

**Евгений Иванович Поплавский**, лаборант-исследователь, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН),  
603950, г. Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46,  
e-mail: keepcalmandhavefun@mail.ru

**Никита Сергеевич Русаков**, лаборант-исследователь, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН),  
603950, г. Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46,  
e-mail: nikitarusakov228@yandex.ru

**Alexey V. Ermoshkin**, Ph.D. in Physico-mathematical sciences, researcher, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS),  
46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

**Ivan A. Kapustin**, Ph.D. in Physico-mathematical sciences, senior researcher, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS),  
46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, e-mail: kapustin-i@yandex.ru

**Alexandr A. Molkov**, Ph.D. in Physico-mathematical sciences, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS),  
46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, e-mail: wave3d@mail.ru

**Evgeny I. Poplavsky**, Laboratory Assistant Researcher, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS),  
46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, e-mail: keepcalmandhavefun@mail.ru

**Nikita S. Rusakov**, Laboratory Assistant Researcher, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS),  
46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, nikitarusakov228@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.11.2019 г.

УДК 629.12.001.2: 656.66.  
DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.37>

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ОТКРЫТЫХ УГОЛЬНЫХ СКЛАДОВ

**С.Н. Сикарев**

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

**Е.И. Адамов**

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

**С.Г. Смирнов**

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

**И.В. Липатов**

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

**М.М. Людмили**

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

*Аннотация. В статье рассматривается необходимость использования математического моделирования для исследования поведения воздушных потоков на территории портового открытого угольного склада. Для исследования этих процессов взаимодействия движения воздушных масс по территории порта с угольными частицами было рассмотрено движение точечного объема воздуха в произвольном пространстве воздушного потока, который является неразрывным. Такой подход позволяет более точно учитывать все метеорологические особенности обдувания: скорость ветра, высотное распределение скоростей, турбулилизацию потока, различные геометрические параметры склада. В результате численной реализации этой модели методом контрольного объема мы получаем возможность анализировать структуру потока обтекающего угольный склад и сделать выводы о характере пылеобразования, отрыва частиц угольной пыли, смещения частиц угольной пыли.*

*Ключевые слова: открытый угольный склад, пыление сыпучего груза, математическая модель.*

### Введение

В настоящее время существует большая проблема с загрязнением окружающей среды в результате распыления и просыпей при погрузочно-разгрузочных работах [1,2].

Нельзя забывать и про жителей, живущих в домах, находящихся в непосредственной близости от территории угольных складов (будь это шахты, угольные терминалы в порту или просто открытые склады для хранения сыпучих грузов). При порывах ветра от 10 м/с пылевое облако достигает и жилых районов [3].

В связи с достаточно сложным техногенным характером данного явления попытки его лабораторного исследования не приводят к успеху, что связано с масштабным эффектом и сложностью воспроизведения ветровых воздействий. Помимо этого, смоделировать сам характер эпюры скоростей по высоте воздушного потока крайне затруднительно, потому что приходится иметь дело с точечными источниками воздушного потока. Поэтому для решения подобных задач, в последнее время стало достаточно активно применяться численное моделирование, как наиболее дешевый и максимально информативный способ исследования.

### Численное моделирование воздушного потока

Воздействие воздушного потока на открытый портовый угольный склад, провоцирует появление ветровой эрозии мелких пылеватых частиц угля с поверхности склада [4]. Оторвавшись с поверхности склада, частицы, начинают двигаться под действием воздушного потока. Часть частиц транзитом уносится за территорию склада, нанося экологический ущерб прилегающей территории. Вторая часть оседает в границах территории угольного склада. Как показала практика, при организации достаточно адекватного пылеуловительного процесса объём уносимых частиц можно существенно уменьшить и тем самым минимизировать загрязнение прилегающей территории и окружающей среды.

Процесс пылеуноса имеет достаточно сложный нелинейный характер, так как определяется и кинематической структурой движения воздушного потока, и турбулентными процессами, которые сопровождают обдувание склада. Помимо этого кардинально будет сказываться взаимное влияние складов друг на друга при изменении «розы ветров», что требует тщательных исследований. Это позволит учесть влияние процесса формирования складов и технологической части их постройки. Так, например, один склад был создан два месяца назад и пыление от него не настолько интенсивное, в отличие от склада, который был создан день или два назад. В результате, при определённых направлениях ветров, первый склад станет естественной защитой для второго склада. Такая нелинейная математическая модель будет учитывать эти сложные и весомые факторы.

Как видно из вышесказанного, определяющим фактором пылеуноса становится кинематическая структура потока ветрового воздействия на поверхности угольных складов [5]. Для исследования этих процессов взаимодействия движения воздушных масс по территории порта с угольными частицами, рассмотрим движение точечного объёма воздуха в произвольном пространстве воздушного потока, который по определению является неразрывным. В качестве объекта исследования возьмём произвольную точку А, ограниченную прямоугольной областью дифференциально малых размеров –  $dx, dy, dz$ .

По второму закону Ньютона, рассматриваемая точка воздуха, воздействующая на частицы угольной пыли, имеет единичную массу. Как и всякое инерционное тело, она перемещается под воздействием суммы сил, вызывающих ускорение  $\vec{a}$ :

$$\sum \vec{F} = m * \vec{a} \quad (1)$$

где:  $\sum \vec{F}$  – сумма сил, действующих на точку воздуха;

$m$  – единичная масса воздуха в пределах дифференциально малого объёма;

$\vec{a}$  – сумма ускорений, действующих на точку воздуха.

Сумма сил, действующих на точку воздуха, складывается из внешних сил, которые воздействуют на поток  $\vec{F}$  и сил, которые будут удерживать рассматриваемую точку в равновесии  $\vec{F}$  со стороны потока [6,7]. Выражение (1) для объёма единичной массы, получит вид:

$$\vec{F} + \vec{F} = \vec{a}_1 + \vec{a}_r \quad (2)$$

Внешние силы, которые будут действовать на каждую воздушную частицу, обтекающую угольный склад, в данном случае будут сведены к одной силе – это сила тяжести. Таким образом, внутренняя сила по «х» и по «z», будет равна 0, а по оси «у» она будет равна «g»

Элементарный объём воздуха А с размерами  $dx, dy, dz$  (рис. 1) находится в состоянии покоя. Величину  $\vec{F}$  разложим на три осевых составляющих.

Изменение давления вдоль линии MN (параллельной оси OX) примем линейным, потому что размер точки дифференциально мал. В связи с этим, падение давления на единицу представим в виде частной производной  $dp/dx$ . В итоге давление в точках на гранях вокруг точки A представим в следующем виде:

$$p_M = p - \frac{1}{2} * dx * \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

$$p_N = p + \frac{1}{2} * dx * \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

где:  $p$  – давление в точке A.

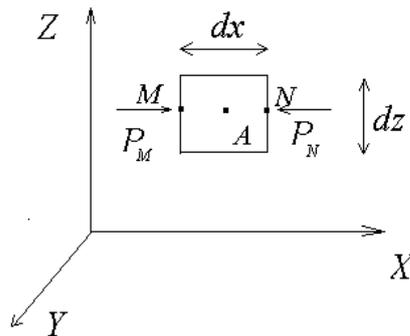


Рис. 1. Схема воздушного потока вокруг точки A

Объем воздуха в точках M и N:

$$m * F_x^* = F_M - F_N = (p_M - p_N) dz dy \quad (5)$$

где:  $m * F_x^* = F_x^* \rho dx dz dy$

Правая часть выражения (5) может быть представлена как:

$$(p_M - p_N) dz dy = \left[ \left( p - \frac{1}{2} dx \frac{dp}{dx} \right) - \left( p + \frac{1}{2} dx \frac{dp}{dx} \right) \right] dz dy = - \frac{dp}{dx} dx dy dz \quad (6)$$

Подставим (6) в соотношение (5), получим:

$$F_x^* \rho dx dz dy = - \frac{dp}{dx} dx dy dz$$

$$F_x^* = - \frac{dp}{dx} \cdot \frac{1}{\rho}$$

Спроецировав силы на оси Y и Z, получим систему уравнений Эйлера для воздуха, находящегося в состоянии покоя:

$$\begin{cases} F_x^* = - \frac{dp}{dx} \cdot \frac{1}{\rho} \\ F_y^* = - \frac{dp}{dy} \cdot \frac{1}{\rho} \\ F_z^* = - \frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{\rho} \end{cases} \quad (7)$$

По принципу Даламбера, величина инерционного ускорения  $\vec{a}_I$  равна:

$$\vec{a}_x = \frac{dV_x}{dt} = \frac{dV_x}{dx} \frac{dx}{dt} + \frac{dV_x}{dy} \frac{dy}{dt} + \frac{dV_x}{dz} \frac{dz}{dt} + \frac{dV_x}{dt} = \frac{dV_x}{dx} V_x + \frac{dV_x}{dy} V_y + \frac{dV_x}{dz} V_z + \frac{dV_x}{dt}$$

Для определения компонента ускорений инерционной составляющей будем рассматривать компоненту ускорения на оси  $Y$  и  $Z$ , в итоге получим выражения:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{I_x} &= \frac{dV_x}{dx} V_x + \frac{dV_x}{dy} V_y + \frac{dV_x}{dz} V_z + \frac{dV_x}{dt} \\ \bar{a}_{I_y} &= \frac{dV_y}{dx} V_x + \frac{dV_y}{dy} V_y + \frac{dV_y}{dz} V_z + \frac{dV_y}{dt} \\ \bar{a}_{I_z} &= \frac{dV_z}{dx} V_x + \frac{dV_z}{dy} V_y + \frac{dV_z}{dz} V_z + \frac{dV_z}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

Для нахождения величины турбулентного ускорения  $\vec{a}_T$  используем гипотезу Рейнольдса-Бусинеска:

$$\vec{a}_T = \nu \nabla^2 \vec{V} = \nu \Delta^2 \vec{V}$$

В проекциях на оси данные выражения получают следующий вид:

$$\begin{aligned} \vec{a}_{T_x} &= \nu \Delta^2 \dot{v}_x = \nu \left( \frac{\partial^2 \dot{v}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{v}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{v}_x}{\partial z^2} \right) \\ \vec{a}_{T_y} &= \nu \Delta^2 \dot{v}_y = \nu \left( \frac{\partial^2 \dot{v}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{v}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{v}_y}{\partial z^2} \right) \\ \vec{a}_{T_z} &= \nu \Delta^2 \dot{v}_z = \nu \left( \frac{\partial^2 \dot{v}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{v}_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{v}_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Полная система дифференциальных уравнений (10), описывающих воздушные потоки вокруг складов пылящих грузов на территории порта находится путем преобразования выражения (2) с учетом выражений (7–9).

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{d^2 V_x}{dx^2} + \frac{d^2 V_x}{dy^2} + \frac{d^2 V_x}{dz^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx}; \\ \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{d^2 V_y}{dx^2} + \frac{d^2 V_y}{dy^2} + \frac{d^2 V_y}{dz^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dy}; \\ \frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{d^2 V_z}{dx^2} + \frac{d^2 V_z}{dy^2} + \frac{d^2 V_z}{dz^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dz}; \\ \frac{dV_x}{dx} + \frac{dV_y}{dy} + \frac{dV_z}{dz} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt}, \end{aligned} \quad (10)$$

Чтобы получить окончательные численные результаты, систему уравнений (10) дополняем начальными условиями и граничными условиями. Определяем область пространства, где задача формируется в расчетную область. Когда будет решен вопрос турбулентности в потоке выбора математической модели для определения  $V_I$  получим окончательное решение системы уравнений.

Для определения коэффициента турбулентного обмена используется классическая методика  $k - \varepsilon$  [8,9]. Данный коэффициент определяется как:

$$v_m = C_p \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

где:  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  
 $C_p$  – турбулентная константа среды;  
 $\varepsilon$  – разбрасывание турбулентной энергии.

Используя выражение (1) и учитывая активную турбулентность в центре с учётом Рейнольдсовской гипотезы, в зонах прилегания к поверхности склада и к поверхности территории порта воспользуемся формулами функций перехода ламинарно-турбулентной зоны в пристенные.

Пример расчёта воздушного потока, обтекающего склад с углём представлен на рисунке 2, где выделена входная область (слева) и нижняя часть (поверхность склада), моделируемая условием не протекания. В выходной области задаётся условие развитого потока. С учётом этого, также ставится и граничное условие математической модели турбулентности.

Склад имеет следующие размеры:

- ширина склада – 30 метров;
- высота склада – 10 метров;
- высота стенки – 12 метров;
- толщина ветрозащитного сооружения – 0,05 метров.

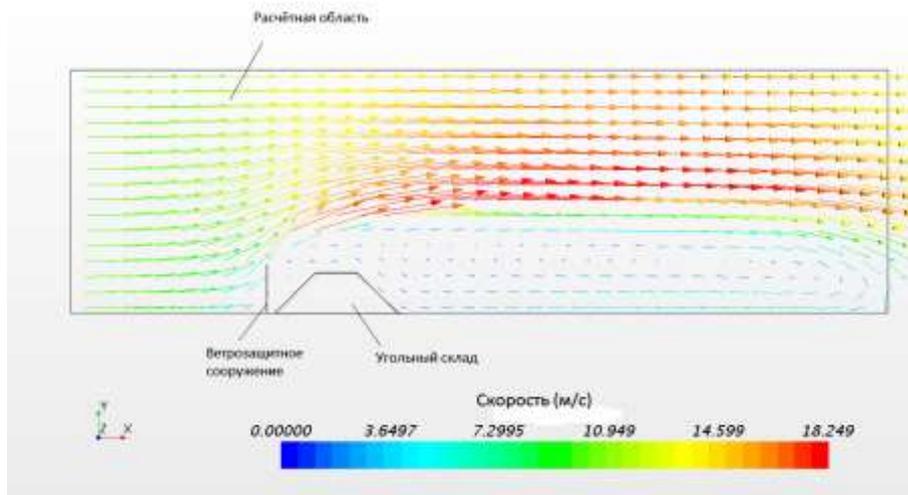


Рис. 2. Векторы направления воздушного потока и примерные значения скоростей

### Заключение

В результате численной реализации этой модели методом контрольного объёма мы получаем возможность анализировать структуру потока обтекающего угольный склад и сделать выводы о характере пылеобразования, отрыва частиц угольной пыли, смещения частиц угольной пыли.

### Список литературы:

1. Отделкин Н.С. Определение потерь и отрицательного воздействия на окружающую среду в результате пылеуноса при хранении навалочных грузов на открытых складах / Н. С. Отделкин, Д.Н. Костюничев. – Материалы Международной научно-технической конференции «Транспортные и технологические машины». – НГТУ, Н. Новгород, 2004, С. 128–132.

2. Отделкин Н.С. Эколого-экономическое обоснование параметров открытых складов навалочных грузов путем прогнозирования процесса пылеуноса. / Н.С. Отделкин, Д.Н. Костюничев. - «Экологические системы и приборы», №1, 2005, С. 30–33 .
3. Отделкин Н.С. Определение воздействия на окружающую среду портовых открытых складов для хранения сыпучих грузов. / Н.С. Отделкин, Д. Н. Костюничев. Тез. докладов VII Международного научно-промышленного форума «Великие реки – 2005». Н.Новгород, 2005, С. 56–57.
4. Саломатников М.Е. Исследование вопросов обоснования емкости и схем механизации складов угля и руды на причалах речных портов: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.19/ Саломатников Михаил Евсеевич. Горький; 1970. – 17 с.
5. Адамов Е.И. Совершенствование методов определения и снижения потерь от пылеобразования при перегрузке сыпучих грузов грейферными кранами и перегружателями. Дис... канд. тех. наук. – Нижний Новгород, 2010. – 122 с.
6. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nicholls // J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp. 201–225.
7. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D.B. Spalding, //, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269–289.
8. El Tahry, S.H. k-ε equation for compressible reciprocating engine flows / S.H. El Tahry // – AIAA J. Energy, – 1983. – No. 4, pp. 345–353.
9. Rodi, W. Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale / Rodi, W. //, Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows – 1979, v. 1, pp. 25–31.

## **DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF BEHAVIOR OF AIR FLOWS IN THE TERRITORY OF OPEN PORT COAL WAREHOUSES**

**Sergey N. Sikarev,**

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

**Evgeny I. Adamov,**

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

**Sergey G. Smirnov,**

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

**Igor V. Lipatov,**

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

**Mark M. Lyudmilin,**

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

*Abstract. The article discusses the need to use mathematical modeling to study the behavior of air flows in the territory of a port open coal warehouse. To study these processes of the interaction of the movement of air masses on the territory of the port with coal particles, the movement of a point volume of air in an arbitrary space of the air flow, which is inextricable, was considered. This approach allows to take into account all meteorological features of blowing more accurately: wind speed, altitude distribution of speeds, flow turbulization, various geometric parameters of the warehouse. As a result of the numerical implementation of this model by the control volume method, we get the opportunity to analyze the structure of the stream flowing around the coal warehouse and draw conclusions about the nature of dust formation, separation of coal dust particles, displacement of coal dust particles.*

*Key words: open coal warehouse, dusting of bulk cargo, mathematical model.*

### **References:**

1. Otdelkin N.S. Determination of losses and negative environmental impact as a result of dust removal during storage of bulk cargo in open warehouses / N. S. Otdelkin, D. N. Kostyunichev. – Materials of the International Scientific and Technical Conference «Transport and Technological Machines». – NSTU, N. Novgorod, 2004, S. 128–132.

2. Otdelkin N.S. Ecological and economic justification of the parameters of open bulk cargo warehouses by predicting the dust removal process. / N. S. Otdelkin, D.N. Kostyunichev. – «Ecological systems and devices», No. 1, 2005, S. 30–33.
3. Otdelkin N.S. Determination of the environmental impact of port open warehouses for the storage of bulk cargo. / N. S. Otdelkin, D.N. Kostyunichev. Thes. reports of the VII International scientific and industrial forum «Great Rivers – 2005». N. Novgorod, 2005, S. 56–57.
4. Salomatnikov M. Ye. Study of the substantiation of capacity and mechanization schemes of coal and ore warehouses at the berths of river ports: author. dis ... cand. tech. Sciences: 05.22.19 / Salomatnikov Mikhail Evseevich. Bitter; 1970. – 17 p.
5. Adamov E.I. Improving the methods for determining and reducing losses from dust during the handling of bulk cargo with clamshell cranes and cranes. Dis ... cand. those. sciences. – Nizhny Novgorod, 2010. – 122 p.
6. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nicholls// J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp.201–225.
7. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D.B. Spalding, //, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269–289.
8. El Tahry, S.H. k-ε equation for compressible reciprocating engine flows / S.H. El Tahry // – AIAA J. Energy, – 1983. – No. 4, pp. 345–353.
9. Rodi, W. Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale / Rodi, W.//, Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows – 1979, v. 1, pp. 25–31.

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

**Сергей Николаевич Сикарев**, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Евгений Иванович Адамов**, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Сергей Геннадьевич Смирнов**, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Игорь Викторович Липатов**, д.т.н., профессор кафедры водных путей гидротехнических сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Марк Михайлович Людмили**, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Sergey N. Sikarev**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of hoisting-and-transport machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Evgeny I. Adamov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of hoisting-and-transport machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Sergey G. Smirnov**, graduate student of the Department of hoisting-and-transport machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Igor V. Lipatov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Waterways, Hydrotechnical Structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Mark M. Lyudmilin**, graduate student of the Department of hoisting-and-transport machines and machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 04.10.2019 г.

## **Раздел II**

**Судостроение, судоремонт  
и экологическая безопасность судна**



## **Section II**

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



УДК: 629.562

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.13>

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИНТО-РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА И ПОВОРОТЛИВОСТИ РЫБОЛОВНОГО СУДНА**

**В.Г. Бугаев**

*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

**Д.В. Тунг**

*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

**Я.Р. Домашевская**

*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

**Ф.Ч. Хиен**

*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

*Аннотация. Адекватная оценка гидродинамических характеристик и поворотливости судна требует тщательного и детального анализа формы корпуса и элементов винто-рулевого комплекса, а также их взаимодействия в процессе промысловых операций. Для оценки поворотливости судна применение экспериментальных и численных методов является чрезвычайно актуальным и удобным решением. Важным преимуществом численных методов по сравнению с традиционными методами, натурными испытаниями и модельными экспериментами является возможность исследования как системы корпус-насадка-винт в целом, так и каждого элемента в отдельности, уделив особое внимание его характеристикам.*

*Целью исследований является анализ с использованием численных методов взаимодействия корпуса и винто-рулевого комплекса (гребного винта в насадке) рыболовного судна, предназначенного для изготовления и эксплуатации во Вьетнаме. Влияние корпуса судна на гидродинамические характеристики винто-рулевого комплекса обусловлено следующими факторами: а) наличием попутного потока за корпусом судна; б) наличием скоса потока воды при дрейфе судна; в) наличием свободной поверхности; г) увеличением скорости потока, набегающего на насадку, создаваемого винтом. Существенное влияние на гидродинамические характеристики насадки, а, следовательно, на ходкость и поворотливость оказывают также скорость судна, частота вращения винта и угол поворота насадки. Приведены результаты расчетов поперечной силы и силы сопротивления, действующих на изолированную насадку, насадку с вращающимся винтом, с вращающимся винтом за корпусом судна, а также диаметра циркуляции.*

*Ключевые слова: рыболовное судно, винто-рулевой комплекс, насадка, поворотливость*

### **Введение**

Численные методы гидродинамики нашли широкое применение в кораблестроении при решении задач моделирования движения судна на спокойной воде, моделирования работы гребного винта в составе винто-рулевого комплекса, управляемости и качки [1–3, 9–14]. Сложность постановки и решения задач численной гидродинамики заключается в создании точных моделей поверхности корпуса судна, насадки и движителя, работающих в составе системы корпус судна – винто-рулевой комплекс. Существенной проблемой является также задание внешних условий таких как: течение потока, свободная поверхность, волнение и др. Несмотря на это, численные методы дают достаточно хорошие результаты, приемлемые с точки зрения решения инженерных задач.

Цель исследования – анализ взаимодействия корпуса и винто-рулевого комплекса рыболовного судна проекта 70133 (ООО СК «Посейдон-Звезда», гл. конструктор В.Е. Рожков), предназначенного для изготовления и эксплуатации во Вьетнаме (рис. 1).

Особенностями проектирования и эксплуатации рыболовных судов являются [4, 5]:

- поиск объектов лова и ведение промысла различными орудиями лова;
- длительное нахождение в море при различных метеорологических условиях;
- ведение промысла в условиях взволнованного моря и в различных режимах движения;

– частое маневрирование в процессе промысловых операций и швартовки в море.

Ошибки, допущенные при выборе промысловой скорости, маневренности и мореходных качеств, могут привести к значительному снижению эффективности судна.

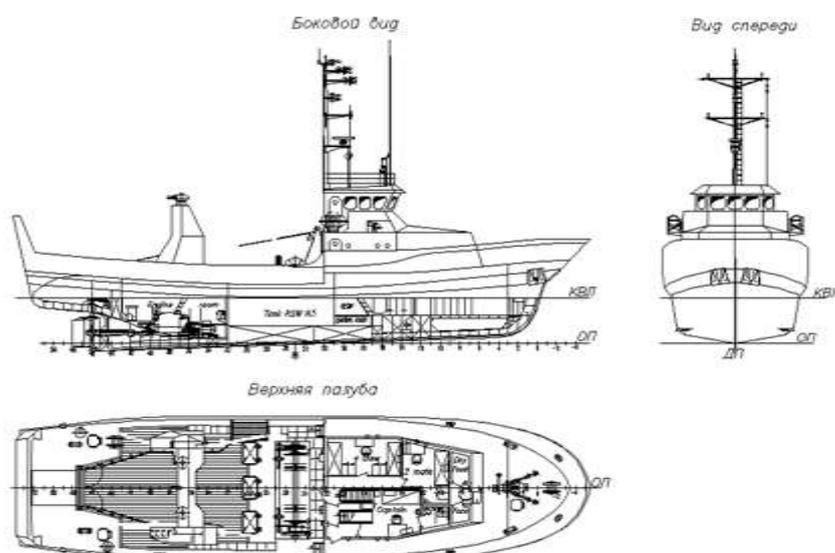


Рис. 1. Общее расположение судна

Судно с дизельным двигателем, одновинтовое, с транцевой кормой, непрерывной верхней палубой и с двухъярусной носовой рубкой. Гребной винт регулируемого шага из Ni-AL-BZ в поворотной направляющей насадке, скорость 11,0 узлов [6].

Таблица 1

Основные характеристики РС 70133

Характеристика	Значение
$L_{пп}$ – длина между перпендикулярами, м	27,31
$B$ – ширина по КВЛ, м	7,08
$T$ – осадка по КВЛ, м	2,4
$H$ – высота борта, м	3,42
$\beta$ – коэффициент полноты подводной части мидель-шпангоута	0,854
$\delta$ – коэффициент общей полноты	0,546
$\varphi$ – коэффициент продольной полноты	0,663
$D$ – водоизмещение по КВЛ, т	254,5

В результате исследований решены следующие задачи:

- созданы 3D-модели поверхности корпуса судна и винто-рулевого комплекса (гребного винта в насадке), позволяющие выполнить анализ взаимодействия корпуса и винто-рулевого комплекса как системы;
- определены гидродинамические характеристики винто-рулевого комплекса в свободной воде;
- определены поперечные силы и силы сопротивления, создаваемые насадкой с вращающимся винтом при различных углах её поворота;
- определена зависимость диаметра циркуляции от скорости движения судна и угла перекладки насадки.

### 1. 3D-модель

Судовая поверхность состоит из линейчатых участков, соединенных между собой сломами. Все сломы находятся выше конструктивной ватерлинии. Таким образом, достигается повышение технологичности конструкций корпуса без существенного роста сопротивления воды.

Для исследований гидродинамических характеристик винто-рулевого комплекса создана параметрическая модель четырехлопастного винта, позволяющая моделировать работу судна в различных режимах промысловых операций и перехода. Базовым выбран винт диаметром 1,5 м, с конструктивным шагом 1,24 м, шаговым отношением 0,827 и дисковым отношением 0,63.

Модель базового варианта насадки со стабилизатором: внутренний диаметр – 1,56 м; длина – 0,8 м; хорда стабилизатора – 0,6 м; высота пера стабилизатора – 1,64 м.

3D-модели поверхности корпуса судна, гребного винта и насадки приведены на рис. 2.

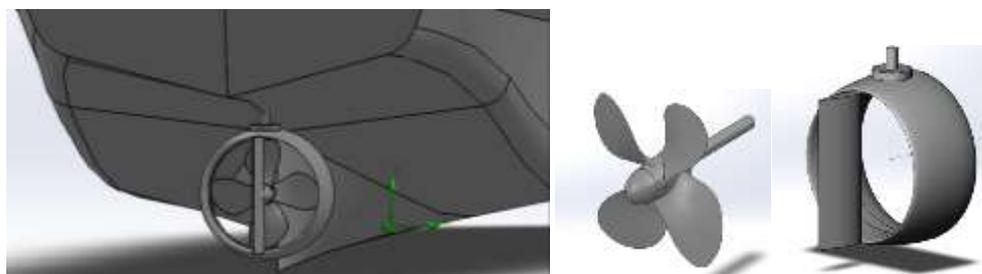


Рис. 2. 3D-модели поверхности корпуса судна, гребного винта и насадки

### 2. Результаты моделирования

#### *Гидродинамические характеристики винта в свободной воде*

При моделировании приняты следующие начальные условия:

- частота вращения винта 350, 400, 450 об/мин;
- скорость набегающего потока от 0 до 8 м/с с шагом 2 м/с.

Результаты расчетов (кривые действия винта):  $K_t$  – коэффициент упора;  $K_q$  – коэффициент момента; КПД – коэффициент полезного действия винта, приведены на рис. 3.

Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются со значениями, полученными по диаграммам винтов регулируемого шага в направляющих насадках, приведенными в справочной литературе (разница составляет 5–10%) [7]. Расчетное значение коэффициента полезного действия винта, установленного на судне, несколько меньше (на 5%), чем у винтов серии В. Однако преимуществом винта регулируемого шага в насадке является его универсальность и возможность управления тягой.

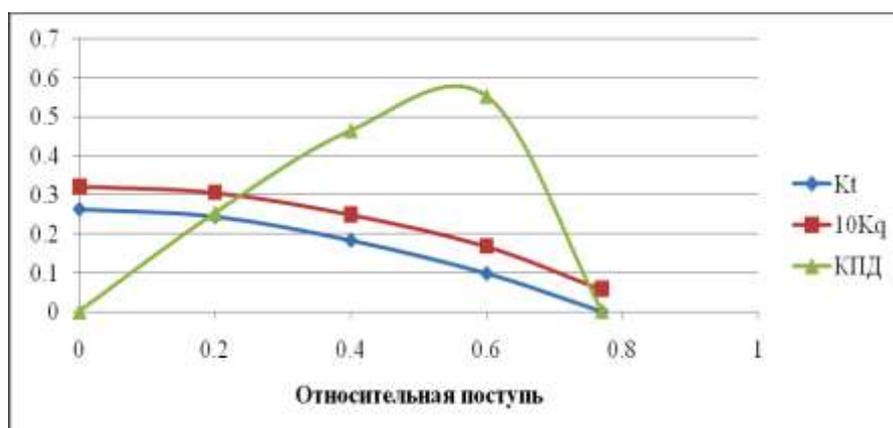


Рис. 3. Кривые действия гребного винта

Выбор размеров винто-рулевого комплекса осуществляется исходя из соображений обеспечения требований ходкости и поворотливости судна. Диаметр, шаг, дисконное отношение гребного винта, а также коэффициенты раствора и расширения насадки определяются в основном из соображений ходкости. В то время как длина насадки, хорда и высота пера стабилизатора – из требований поворотливости [8]. Строго говоря, насадка со стабилизатором и винтом – это система и рассматривать её необходимо с системных позиций.

Влияние корпуса судна и винта на гидродинамические характеристики насадки обусловлено следующими факторами: а) наличием попутного потока за корпусом судна; б) наличием скоса потока воды при дрейфе судна; в) наличием свободной поверхности; г) увеличением скорости потока, набегающего на насадку, создаваемого винтом. Существенное влияние на гидродинамические характеристики насадки, а, следовательно, на ходкость и поворотливость оказывают также скорость судна, частота вращения винта и угол поворота насадки [9].

*Поперечная сила и сила сопротивления насадки.* Ниже приведены результаты расчетов поперечных сил и сил сопротивления, действующих на изолированную насадку, насадку с вращающимся винтом и с вращающимся винтом за корпусом судна.

*Изолированная насадка.* Кривые зависимости гидродинамических характеристик (поперечной силы  $F(y)$  и силы сопротивления  $F(x)$ ) изолированной насадки со стабилизатором от углов её поворота (при различных скоростях набегающего потока) показаны на рис. 4.

*Насадка с вращающимся винтом.* Вращающейся гребной винт существенно изменяет поперечную силу насадки вследствие увеличения скорости её обтекания и изменения углов атаки. Это происходит в результате закручивания струи и наличия в ней тангенциальных вызванных скоростей.

При моделировании приняты следующие начальные условия:

- частота вращения винта  $n$ : 350, 400, 450 об/мин;
- скорость набегающего потока  $v$ : 2, 4, 6 м/с;
- угол поворота насадки  $\alpha_p$ : 10, 20, 30 град.

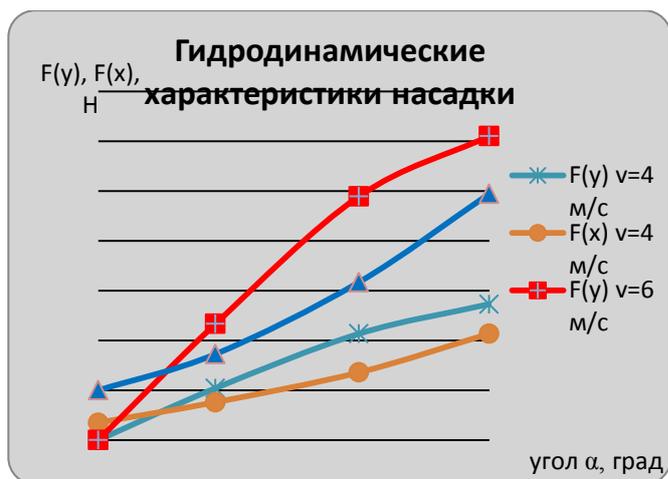
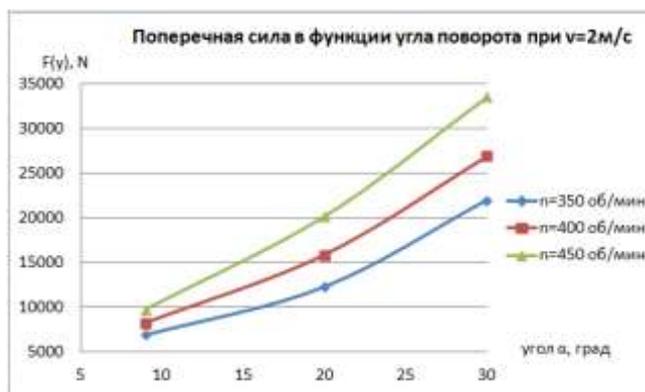


Рис. 4. Зависимость гидродинамических характеристик изолированной насадки от углов её поворота

Поперечная сила зависит от борта перекладки насадки и направления вращения винта. На рис. 5 приведены гидродинамические характеристики, соответствующие направлению перекладки насадки, с наибольшими значениями поперечной силы.



а)



б)

Рис. 5. Зависимость поперечной силы насадки от углов её поворота: а)  $v=2$  м/с; б)  $v=6$  м/с

Гидродинамические характеристики насадки (поперечные силы  $F(y)$  и силы сопротивления  $F(x)$ ) с вращающимся винтом при скорости набегающего потока 4 м/с приведены на рис. 6.

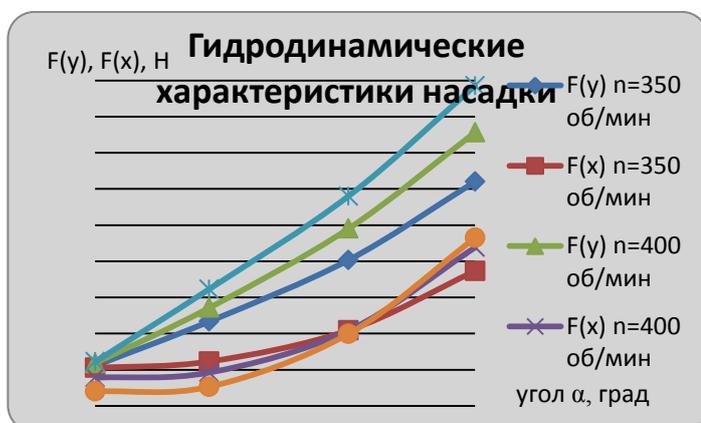


Рис. 6. Гидродинамические характеристики насадки с вращающимся винтом при скорости набегающего потока 4 м/с

Вращающийся в насадке винт формирует струю повышенной скорости, которая, набегающая на профиль насадки, создает дополнительный упор. На малых скоростях дополнительный упор может составлять до 10–15 %.

Дополнительная поперечная сила, возникающая вследствие набегающего потока от вращающегося винта, составляет от 8% до 40% в зависимости от частоты вращения винта.

Насадка с вращающимся винтом за корпусом судна. Зависимость гидродинамических характеристик насадки от углов её поворота с вращающимся винтом за корпусом судна при скорости его движения 4 м/с приведена на рис. 7.

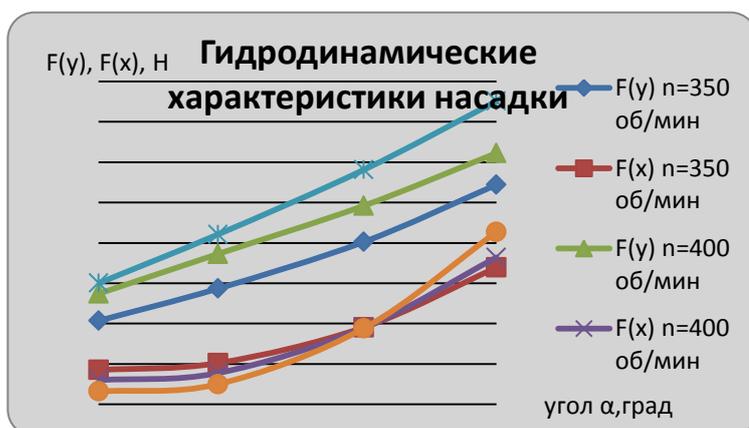


Рис. 7. Зависимость гидродинамических характеристик насадки от углов её поворота с вращающимся винтом за корпусом судна

Наличие тангенциальных скоростей потока, набегающего на насадку, попутного потока и близость обшивки корпуса судна приводит к уменьшению поперечной силы на 18–25%.

Коэффициент попутного потока корпуса судна, скорость потока, набегающего на винт, и коэффициент нагрузки винта по упору определяются в процессе моделирования системы корпус-винт-насадка, но в настоящем исследовании не рассматриваются как результат моделирования.

*Поворотливость.* В процессе перекладки насадки на ней возникает поперечная сила  $F(y)$  и момент этой силы  $M(y)$ , стремящийся повернуть судно в сторону перекладки насадки. Одновременно с этим появляется сила, вызывающая смещение судна в поперечном направлении в сторону противоположную перекладки насадки. В результате поворота судна меняется направление и скорость набегающего потока, и появляются дополнительные силы, приложенные в центре давления на корпусе судна. Продольная дополнительная сила  $P(x)$  увеличивают сопротивление воды, а поперечная  $P(y)$  – уравнивает силу поперечного смещения судна и вызывает появление крена.

При малых углах дрейфа  $\beta$  центр давления смещен в нос от центра тяжести судна, и поперечная сила увеличивает поворачивающий момент. По мере увеличения угла дрейфа  $\beta$  центр давления смещается в корму от центра тяжести, а момент, возникающий при этом, уравнивает момент поперечной силы на насадке.

В установившийся период циркуляции наступает равновесие всех сил и моментов, действующих на судно, и циркуляция превращается в окружность диаметром  $D_{ц}$ . Угол дрейфа и скорость судна на циркуляции стабилизируются и принимают постоянное значение до окончания поворота.

Чем больше угол поворота насадки, тем больше поперечная сила и сила сопротивления воды движению судна и тем больше потеря скорости на циркуляции.

#### Алгоритм моделирования циркуляции

*Маневренный период.* В начальный момент судно движется прямолинейно с заданной скоростью (в исследовании поворотливости 4; 5; 6 м/с), затем насадка переключается на угол 10, 20, 30 град.

*Эволюционный период.* Судно начинает поворачиваться, при этом изменяются траектория движения, угол набегающего потока и сопротивление движению. Угол  $\beta$ , при котором моменты  $M_{1z}$  и  $M_{2z}$  (см. рис. 8) равны система стабилизируется.

*Установившийся период.* Определяются сопротивление движению (скорость судна снижается до 3; 4; 5 м/с), центробежная сила, вызывающая крен, и диаметр установившейся циркуляции.

На рис. 8 приведена система сил и моментов, действующих на судно при циркуляции, и картина работы винто-рулевого комплекса с повернутой на 30 град насадкой и вращающимся винтом.

Диаметр циркуляции (по Шенхеру) определяется по приближенной формуле [8]:

$$D_{ц} = \frac{2 \cdot k \cdot V}{C_y \cdot S_p \cdot \cos \alpha_p}, (L)$$

где:  $k$  – эмпирический коэффициент, зависящий от отношения  $\frac{V}{S_{он} \cdot L}$ ;

$S_{он}$  – площадь погруженной части диаметральной плоскости судна, м<sup>2</sup>;

$V$  – объемное водоизмещение судна, м<sup>3</sup>;

$C_y$  – коэффициент подъемной силы;

$S_p$  – площадь пера руля (насадки), м<sup>2</sup>;

$\alpha_p$  – угол перекладки пера руля, град.

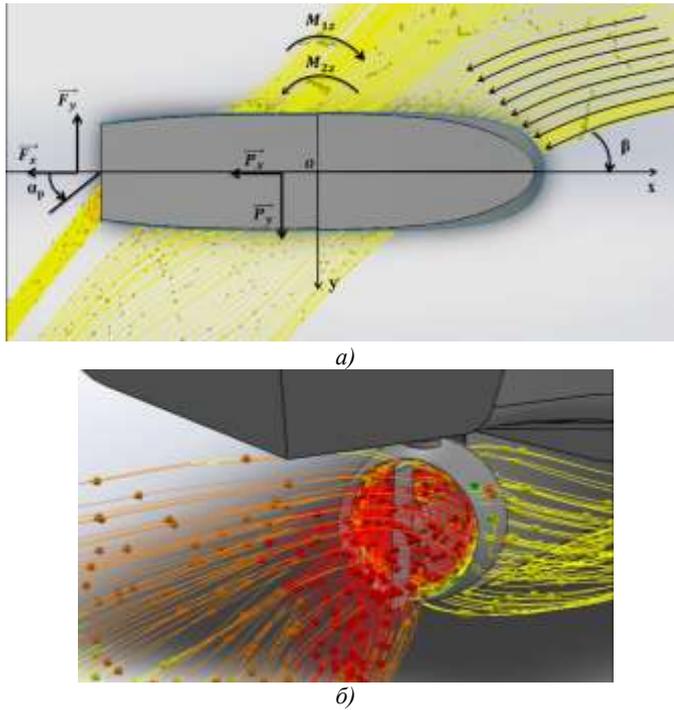


Рис. 8. Иллюстрации к моделированию:  
 а) силы и моменты, действующие на судно при циркуляции;  
 б) картина работы винто-рулевого комплекса

Результаты численного моделирования и расчетов по формуле Шенхера приведены на рис. 9.

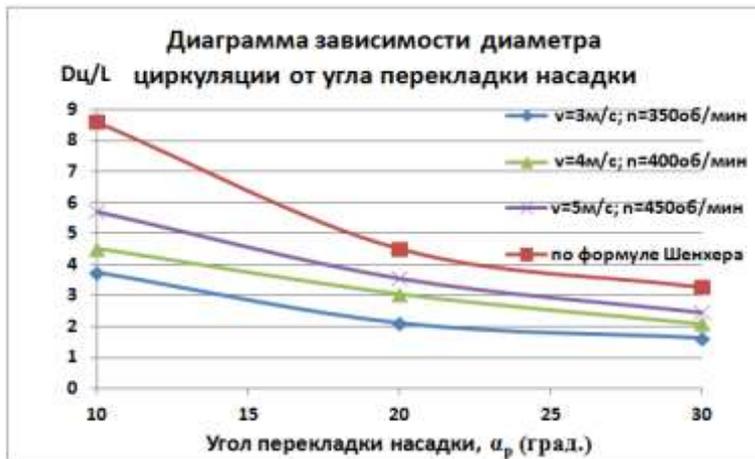


Рис. 9. Диаграмма зависимости диаметра циркуляции от угла перекадки насадки

Завышенные значения диаметра циркуляции, полученные по формуле Шенхера, по сравнению с численными расчетами, можно объяснить следующим образом:

– в формуле Шенхера используется коэффициент подъемной силы пера руля, а не насадки со стабилизатором. Поэтому поперечная сила по Шенхеру меньше, чем в численном исследовании.

– в формуле Шенхера подъемной силы пера руля зависит только от угла атаки, и не зависит от скорости набегающего потока при циркуляции.

### **3. Заключение**

1. Поле скоростей в плоскости диска винта имеет значительную окружную неравномерность, что связано с V-образной формой обводов в кормовой оконечности. Установка насадки несколько сглаживает эту неравномерность и компенсирует снижение (по сравнению с рулем) поперечной силы и тяги винта, возникающих вследствие неравномерности потока.

2. Наличие тангенциальных скоростей потока, набегающего на насадку, попутного потока и близость обшивки корпуса судна приводит к уменьшению поперечной силы на 18–25%. Вращающийся в насадке винт формирует струю повышенной скорости, которая, набегающая на профиль насадки, создает дополнительный упор. На малых скоростях дополнительный упор может составлять до 10–15%. Дополнительная поперечная сила, возникающая вследствие набегающего потока от вращающегося винта, составляет от 8% до 40% в зависимости от частоты вращения винта.

3. С увеличением угла перекладки насадки уменьшается диаметр установившейся циркуляции и увеличивается угол крена. Увеличение скорости на циркуляции вызывает незначительное увеличение диаметра циркуляции.

4. Картина результатов моделирования винто-рулевого комплекса судна, а также численные значения выходных параметров свидетельствуют о пригодности численного моделирования для использования на этапе проектирования и инженерного анализа до проведения экспериментальных исследований.

5. Важным преимуществом численных методов по сравнению с традиционными методами, натурными испытаниями и модельными экспериментами является возможность исследования как системы корпус-насадка-винт в целом, так и каждого элемента в отдельности.

#### **Список литературы:**

1. Блищик А.Э., Таранов А.Е. Численное моделирование динамики судна в задачах управляемости и качки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384). – С. 29–38.
2. Печенюк А.В. Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судового корпуса // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6. – С. 889–899.
3. Печенюк А.В. Численное моделирование работы гребного винта в составе судовой винто-рулевой колонки // Инженерные системы–2017: Труды Международного форума: Москва, 11–12 апреля 2017 г. / Инжиниринговая компания «ТЕСИС». – 2017. – С. 99–110.
4. Раков А.И. Особенности проектирования промысловых судов. Л.: Судостроение, 1966. – 144 с.
5. Раков А.И. Оптимизация основных характеристик и элементов промысловых судов. Л.: Судостроение, 1978. – 232 с.
6. Рыболовное судно проекта 70133, ООО «Посейдон Звезда», Владивосток.
7. ОСТ 5.4129-75. Комплекс движительный гребной винт–направляющая насадка. Методика расчета и правила проектирования [Текст]: – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 202 с.
8. Справочник по теории корабля: в 3 т. т.3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания /под ред. Я. И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. – 539 с.
9. Знамеровский В.П. Теоретические основы управления судном /под ред. проф. Д. В. Дорого-стайского и проф. М. М. Лескова. – Л.: Издательство ЛВИМУ, 1974. – 127 с.
10. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power, Cambridge, GB. University Press, 2011, 544pp.
11. Kwang-Jun Paik, Numerical study on the hydrodynamic characteristics of a propeller operating beneath a free surface. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 9, Issue 6, November 2017, pp. 655–667.
12. Spyros A. Kinnas, Ye Tian, Abhinav Sharma, Numerical modeling of a marine propeller undergoing surge and heave motion. International Journal of Rotating Machinery, Volume 2012, Article ID 257461, 8 pages.

13. Tu T.N. Numerical simulation of propeller open water characteristics using RANSE method. Alexandria Engineering Journal, Volume 58, Issue 2, 2019, pp. 531-537.
14. Bertram V. Practical ship hydrodynamics (2nd edition), Elsevier, 2011, 390pp.
15. Bugaev V.G., Tung Dam Van, Domashevskaya Ya.R. Study the hull form and propeller-rudder system of the fishing vessel for Vietnam. Proceedings of the Intern. conf. on advances in computational mechanics. Series Lectures Notes in Mechanical Engineering. 2017, pp. 691–700. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-7149-2\\_47](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-7149-2_47); <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57201007287-19.12.2018>

## THE NUMERICAL MODELLING OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE PROPELLER-RUDDER SYSTEM AND TURNING CAPACITY OF THE FISHING VESSEL

**Victor G. Bugaev,**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Dam Van Tung,**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Yana R. Domashevskaya,**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Pham Trung Hiep,**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

*Abstract. Adequate assessment of the vessel's turning capacity requires a thorough and detailed analysis of the hull shape and characteristics of the propeller-rudder system, as well as their interaction in the process or fishing operations. The use of experimental and numerical methods is extremely relevant and convenient solution to assess the vessel's turning capacity. An important advantage of numerical methods in comparison with traditional methods, full-scale tests and model experiments are the possibility of studying both the hull-nozzle-propeller system as a whole and each element separately, paying particular attention to its characteristics. The purpose of the research is to substantiate, using numerical methods of the hull shape and the characteristics of the propeller-rudder system (propeller in the nozzle) of the fishing vessel, which is intended for manufacturing and operation in Vietnam. The influence of the hull and the propeller on the hydrodynamic characteristics of the nozzle is due to the following factors: a) the presence of a propeller wave behind the hull; b) the presence of downwash of water flow when the vessel drifts; c) the presence of a free surface; d) increasing the flow rate, which runs on the nozzle, is made by the propeller. The speed of the vessel, the speed of rotation of the propeller and the angle of the nozzle rotation have also a significant influence on the hydrodynamic characteristics of the nozzle, and, consequently, on the propulsion and turning capacity. The results of calculations of the transverse and the resistance force acting on an isolated nozzle, a nozzle with a rotating propeller and with a rotating propeller behind the hull have been presented.*

*Keywords: fishing vessel, propeller-rudder system, nozzle, turning capacity.*

### References

1. Blischik A.E., Taranov A YE. Chislennoe modelirovanie dinaviki sudov v zadachach upravlyаемости i kachki. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo chentra. 2018; 2 (384) – P.29-38.
2. Pechenyuk A.V. Jetalonnoe testirovanie PK FlowVision v zadache modelirovanija obtekanija sudovogo korpusa [Benchmarking of CEA FlowVision in ship flow simulation] // Computer Research and Modeling. – 2014. – Vol. 6. – P. 889– 899 (in Russian).
3. Pechenyuk A. V. Chislennoe modelirovanie raboty grebnogo vinta v sostave sudovoj Bvinto-rulevoj kolonki [Numerical simulation of marine propeller operation as part of azimuthing thruster] // Engineering systems-2017: Proc. of Int. Conf.: Moscow, April 11-12, 2017 / Inzhiniringovaya kompaniya «TESIS». – 2017. – P. 99 -110 (in Russian).
4. Rakov A.I. Osobennosti proektirovanija promyslovyyh sudov. L.: Sudostroenie, 1966. – 144 s.

5. Rakov A.I. Optimizacija osnovnyh harakteristik i jelementov promyslovyh sudov. L.: Sudostroenie, 1978. – 232 s.
6. Rybolovnoe sudno proekta 70133, ООО «Posejdon Zvezda», Vladivostok.
7. OST 5.4129-75. Kompleks dvizhitel'nyj grebnoj vint–napravljajushhaja nasadka. Metodika rascheta i pravila proektirovanija [Tekst]: – M.: Izd-vo standartov, 1975. – 202 s.
8. Spravochnik po teorii korablja: v 3t. t.3. Upravljaemost' vodoizmeshhajushhih sudov. Gidrodinamika sudov s dinamičeskimi principami podderzhanija /pod red. Ja. I. Vojtkunskogo. L.: Sudostroenie, 1985. – 539 s.
9. Znamerovskij V.P. Teoreticheskie osnovy upravleniya sudnom / pod red. prof. D.V. Dorogostajskogo i prof. Leskova. – L.: Izdatel'stvo LVIMU, 1974. – 127 s.
10. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power, Cambridge, GB. University Press, 2011, 544pp.
11. Kwang-Jun Paik, Numerical study on the hydrodynamic characteristics of a propeller operating beneath a free surface. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 9, Issue 6, November 2017, pp. 655-667.
12. Spyros A. Kinnas, Ye Tian, Abhinav Sharma, Numerical modeling of a marine propeller undergoing surge and heave motion. International Journal of Rotating Machinery, Volume 2012, Article ID 257461, 8 pages.
13. Tu T.N. Numerical simulation of propeller open water characteristics using RANSE method. Alexandria Engineering Journal, Volume 58, Issue 2, 2019, pp. 531-537.
14. Bertram V. Practical ship hydrodynamics (2nd edition), Elsevier, 2011, 390pp.
15. Bugaev V.G., Tung Dam Van, Domashevskaya Ya.R. Study the hull form and propeller-rudder system of the fishing vessel for Vietnam. Proceedings of the Intern. conf. on advances in computational mechanics. Series Lectures Notes in Mechanical Engineering. 2017, pp. 691-700. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-7149-2\\_47](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-7149-2_47); <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57201007287-19.12.2018>

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

**Виктор Григорьевич Бугаев**, д.т.н., профессор кафедры кораблестроения и океанотехники, Инженерной школы, Дальневосточный федеральный университет (ФГАОУ ВО «ДВФУ»), 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, email: [v\\_bugaev@mail.ru](mailto:v_bugaev@mail.ru)

**Дам Ван Тунг**, аспирант, кафедры кораблестроения и океанотехники, Инженерной школы, Дальневосточный федеральный университет (ФГАОУ ВО «ДВФУ»), 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, e-mail: [dammvantung@mail.ru](mailto:dammvantung@mail.ru)

**Яна Руслановна Домашевская**, аспирант, кафедры кораблестроения и океанотехники, Инженерной школы, Дальневосточный федеральный университет (ФГАОУ ВО «ДВФУ»), 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, e-mail: [100-70-100dom@mail.ru](mailto:100-70-100dom@mail.ru)

**Фам Чунг Хиен**, аспирант, кафедры кораблестроения и океанотехники, Инженерной школы, Дальневосточный федеральный университет (ФГАОУ ВО «ДВФУ»), 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, e-mail: [phiepast07@gmail.com](mailto:phiepast07@gmail.com)

**Victor G. Bugaev**, doctor of Engineering Sciences, professor of the Department of Shipbuilding and ocean engineering, School of engineering, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922

**Dam Van Tung**, postgraduate student of the Department of Shipbuilding and ocean engineering, School of engineering, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922

**Yana R. Domashevskaya**, postgraduate student of the Department of Shipbuilding and ocean engineering, School of engineering, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922

**Pham Trung Hiep**, postgraduate student of the Department of Shipbuilding and ocean engineering, School of engineering, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922

Статья поступила в редакцию 11.12.2019 г.

УДК 629.122

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.38>

## КЛАССИФИКАЦИЯ И АРХИТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ СУДОВ

**И.А. Гуляев**

*Российский Речной Регистр, г. Москва, Россия*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2602-3115>

**Е.П. Роннов**

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

*Аннотация. В статье приведена современная классификация морских комбинированных судов неограниченного плавания по типу и назначению, проведен обзор и анализ отечественных проектов комбинированных судов ограниченного, внутреннего и смешанного (река-море) плавания, находящихся в эксплуатации и их характеристик. Дается обзор исследований в части оптимизации и обоснования главных элементов и характеристик комбинированных судов. Предлагается путь решения задачи по оптимизации элементов и характеристик комбинированных судов с использованием алгоритмов и программного обеспечения, подлежащих разработке на основе математического моделирования конструкции этих судов различных архитектурно-конструктивных типов.*

*Ключевые слова: комбинированное судно, судно внутреннего плавания, судно смешанного (река-море) плавания, нефтерудовоз, балластные (порожные) переходы, наливные грузы, навалочные грузы, классификация судов, тип и назначение, оптимизация элементов и характеристик.*

### Введение

Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2020 года и на дальнейшую перспективу предполагала повышение конкурентоспособности и качества продукции судостроения, ликвидацию критического научно-технического отставания от промышленно развитых стран мира. При этом одним из ключевых ориентиров указанной Стратегии является транспортная безопасность (обеспечение морского и речного флотов необходимым тоннажем для грузовых и пассажирских перевозок силами национальных перевозчиков).

А утвержденная распоряжением Правительства РФ от 28 октября 2019 г. №2553-р Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года, в частности, предполагает в целях удовлетворения потребностей внутреннего рынка строительство около 250 морских транспортных судов и более 1500 транспортных судов смешанного (река-море) плавания.

В условиях ежегодного снижения объемов перевозок грузов водным транспортом Российской Федерации [1] в ближайшее время наибольшую остроту приобретет конкурентная борьба за грузопотоки, и в связи с этим вопросы экономичности и транспортной эффективности флота в эксплуатации приобретут наибольшую актуальность. С учетом этого интерес к концепции комбинированных судов в ближайшее время будет только возрастать [2].

Появлению комбинированных судов в мировом торговом судоходстве способствовало появление направлений грузопотоков, в которых перевозки нефтепродуктов в прямом (или обратном направлении) сочетаются с перевозками руды, угля, зерна и прочих навалочных грузов [3], [4], [5]. При этом в большинстве случаев грузопотоки наливных и навалочных грузов направлены именно в противоположные стороны [6],

а опыт эксплуатации специализированных судов типа нефтеналивных подтверждает, что при перевозке грузов значительная часть времени приходится на балластные переходы.

С учетом этого в последние годы проявляется большой интерес к проектированию комбинированных судов, использование которых позволяет оперативно реагировать на изменение характера перевозок, повысить рентабельность судов и уменьшить непроизводительные затраты на переоборудование [7].

### **Современная классификация комбинированных судов**

Что же понимают под комбинированным судном? В соответствии с определением подпункта г) пункта 8 Технического регламента о безопасности объектов морского транспорта, утвержденного постановлением Правительства РФ от 12.08.2010 № 620 (ред. от 04.09.2012) комбинированное судно – судно, предназначенное для перевозки наливом сырой нефти и нефтепродуктов, а также насыпных грузов [8].

В правилах классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства [9] п. 1.1.1 части I под комбинированным судном понимается судно, предназначенное для перевозки наливом сырой нефти и нефтепродуктов, а также насыпных грузов (нефтерудовозы, нефтенавалочные и т.п. суда).

Пункт 2.2.20 части 0 Правил классификации и постройки судов Российского Речного Регистра [10] к комбинированным относит суда, предназначенные для попеременной перевозки или жидких грузов наливом, или насыпных и (или) других твердых грузов навалом, при этом для каждого рода груза предусматриваются отдельные грузовые помещения.

Первые две формулировки практически идентичны, тогда как последняя более конкретно указывает на особенности конструктивного типа корпуса.

Рассмотрим сложившуюся более узкую классификацию в современной морской практике [11], отражающую архитектурно-конструктивные особенности этих судов.

Нефтерудовозы типа ОО (Ore/Oil carrier) предназначены для перевозки нефти и руды. В узкие центральные трюмы загружают руду, а в бортовые танки – нефть. Это суда, приспособленные для транспортировки руды в относительно узких гладкостенных центральных трюмах с высоким двойным дном и нефти в тех же трюмах и в бортовых танках без двойного дна. Объем центральных рудных трюмов составляет 40–50% полного грузового объема. Дедвейт крупнейших судов составляет 230–280 тыс. т. Данный тип является наиболее старым из комбинированных судов (рис. 1). В настоящее время в связи с требованием конвенции [12] о наличии вторых бортов и второго дна в грузовых танках такие суда не эксплуатируются, либо эксплуатируются весьма ограниченно.

Нефтенавалочники типа ОВ (Oil/Bulk carrier) используются для перевозки нефти и относительно легких навалочных грузов и являются как бы подклассом предыдущего судна. Руду данный тип перевозить не может. Навалочные грузы размещаются в центральных трюмах, а нефть в бортовых танках и при необходимости в центральных трюмах. По конструкции трюмов они близки к нефтерудовозам, предназначенным для перевозки нефти во всех грузовых отсеках и сравнительно легких навалочных грузов в центральных трюмах объемом 65–70% от полного грузового объема.

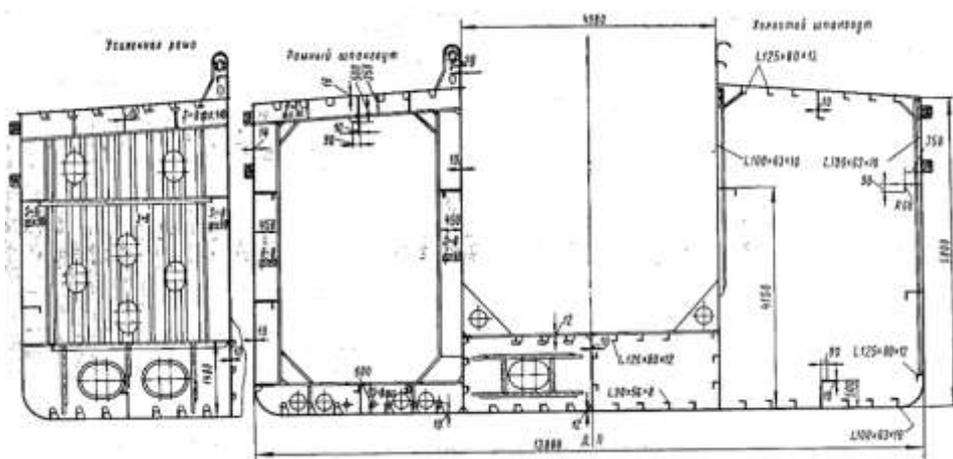


Рис. 1. Мидель-шпангоут нефтерудовоза ограниченного плавания

Нефтенавалочники-рудовозы типа ОВО (Oil/Bulk/Ore carrier) используются для перевозки нефти, относительно легких навалочных грузов и руды, являются самыми современными в своем классе [13], [14], [15]. Специальная конструкция позволяет перевозить все эти грузы в одних и тех же грузовых отсеках: трюмах-танках, ограниченных двойным дном и двойными бортами (рис. 2). Количество трюмов-танков обычно нечетное (7–11), руда загружается в специально подкрепленные трюмы через один. Дедвейт современных судов ОВО – от 25 до 170 тыс. т.



Рис. 2. Нефтенавалочники-рудовозы типа ОВО (Oil/Bulk/Ore carrier)

Разновидностью типа ОВО являются суда типа PROBO (Product/oil/bulk/ore carrier), и отличающиеся от них возможностью принимать в отдельные трюмы-танки различные нефтепродукты. Для выгрузки используются судовые погружные насосы, для каждого трюма – отдельный.

Суда типа BORO (Bulk/oil/ro ship) предназначены для перевозки навалочного груза, нефти и генерального груза, загружаемого в специальный твиндек накатом (рис. 3).



Судно типа BORO для перевозки насыпных грузов и грузовых единиц на колесах

Рис. 3. Комбинированное судно типа BORO (Bulk/oil/ro ship)

### Обзор и анализ реализованных проектов

Во второй половине XX века спроектирован и успешно реализован в морской практике ряд проектов морских нефтерудовозов и комбинированных судов неограниченного плавания, характеристики которых представлены в таблице 1.

Транспортный флот СССР, начиная с 1974 года, начал пополняться морскими комбинированными судами (нефтерудовозами) неограниченного плавания типа «Маршал Будённый» проекта В-524, постройка которых осуществлялась в Польской народной республике. Серия составила 4 единицы. Суда успешно эксплуатировались, в основном, в Новороссийском морском пароходстве [6].

Таблица 1

Основные характеристики первых комбинированных судов неограниченного плавания [6]

Тип и наименование	Страна		Дедвейт, тонн	L, м	B, м	H, м	T, м	Мощность ГД, л.с.	Скорость, км/ч	Коэффициент общей полноты
	Флаг	Строитель								
ОО «Svealand»	Швеция	Швеция	21200	178,0	22,0	13,40	9,85	9200	-	-
ОО «Malmland»	Швеция	Швеция	12824	141,0	18,6	10,36	8,15	4500	24,0	-
ОО «Rautas»	Швеция	Швеция	12294	139,7	18,0	10,82	8,46	4600	24,0	-
ОО «Porus»	Швеция	Швеция	15902	153,9	20,73	11,73	8,66	7350	25,9	-
ОО «Bomy Hills»	Либерия	Англия	24252	182,9	24,38	13,11	9,33	8500	26,8	-
ОО «Vittangy»	Швеция	Швеция	21400	170,7	22,7	13,49	9,45	7200	26,8	-
ОО «Kalifornian»	США	Япония	20849	184,7	21,79	13,26	10,03	9900	30,5	-
ОВ «Sangender-son»	Либерия	ФРГ	9200	132,0	19,20	9,00	6,12	1850	19,0	-
ОО «Andros Tander» (далее переименован в «Keravnos»)	Панама	Япония	39206	201,2	28,20	14,63	10,74	12500	28,6	-
ОВО «Mando Theodoracopulos» (далее переименован в «Proton»)	Греция	Япония	28380	188,0	25,60	13,40	9,96	11000	27,7	-
ОВО «San Juan Trader»	Либерия	Япония	62200	236,2	31,85	18,17	12,40	16800	30,5	-

Тип и наименование	Страна		Дедвейт, тонн	L, м	B, м	H, м	T, м	Мощность ГД, л.с.	Скорость, км/ч	Коэффициент общей полноты
	Флаг	Строитель								
OBO «Naess Norseman»	Либерия	ФРГ	72300	242,3	31,70	18,80	13,68	17600	30,5	-
ОО «Svealand»		Швеция	282450	321,6	54,56	28,96	21,7	41000	30,3	0,850
ОО «Hoegh Hill»		Япония	249250	313,0	52,0	27,30	20,5	33000	28,3	0,841
ОО «Bergelstra»		Югославия	227550	300,0	50,0	26,00	20,41	35000	29,1	0,840
ОВ «Cedros»		Япония	144000	286,5	43,3	24,69	16,46	27500	28,1	0,837
OBO «Furness Bridge»		Англия	173218	282,1	44,23	25,01	18,45	30400	28,6	0,846
OBO «Tarim»		ФРГ	152300	281,0	42,5	24,7	17,46	30400	29,9	0,840
OBO «Polarbris»		ФРГ	141300	266,5	43,4	22,6	16,61	24000	29,1	-

С 1976 г. в СССР начали строиться морские комбинированные суда (нефтерудовозы) неограниченного плавания типа «Борис Бутома» проекта 1593 (проектант ЦКБ «Черноморсудопроект»), постройка которых осуществлялась на Николаевском судостроительном заводе «ОКЕАН». Серия составила 4 единицы [7]. Характеристики отечественных проектов комбинированных судов неограниченного плавания представлены в таблице 2.

Первые отечественные комбинированные суда смешанного (река–море) плавания (проекты 1553 и 1570) были разработаны конструкторским бюро завода «Красное Сормово» в 1964 г. Постройка судов осуществлялась на Пермском судостроительном заводе «Кама» в период с 1971 по 1992 г. [16].

Таблица 2

**Характеристики реализованных отечественных проектов комбинированных судов неограниченного плавания**

Тип и назначение	№ пр.	Количество построенных судов	L, м	B, м	H, м	Дедвейт, тонн	Суммарная вместимость грузовых танков по нефти, м <sup>3</sup>	Тгр, м	Скорость, км/ч	Мощность ГД, кВт
Нефтерудовоз типа «Маршал Будённый»	B-524	4	244,5	38,8	22,0	101900	107200	16,0	27,11	-
Нефтерудовоз типа «Борис Бутома»	1593	4	258,2	39,8	21,4	100000	114340	14,5	27,6	15403

При этом проект 1553 строился на класс «МЗ,0» Речного Регистра РСФСР. Головное судно «Нефтерудовоз-1» было построено в 1968 году. Всего в период с 1968 по 1971 г. было построено 6 единиц. Технические характеристики проекта 1553 предусматривали возможность перевозки судном руды и нефтепродуктов из порта Кандалакша на Белом море в Череповец, а также угля и других сыпучих грузов в обратном направлении [17].

Проект 1570 строился на класс «II СП» Морского Регистра СССР. Головное судно «Нефтерудовоз-8М» было построено в 1971 году. Всего в период с 1971 по 1992 г. было построено и спущено на воду 53 судна по указанному проекту. Проект 1570, по сравнению с проектом 1553 предполагал смешанное и ограниченное морское плавание в Белом, Балтийском, Черном и Каспийском морях, с удалением на 50 миль от портов-убежищ, при расстоянии между портами-убежищами не более 100 миль [17].

В 1994 году ЦКБ «Шельф», г. Волгоград, разработало проект 15790, являющийся глубокой модернизацией проекта 1570. Проект 15790 имеет большую высоту борта и предусматривает увеличенную по сравнению с пр. 1570 грузоподъемность как в морских районах, так и на внутренних водных путях. По указанному проекту в 1995 году было построено судно «Инженер Шлем», а в 2002 году – теплоход «Капитан Зимин». Нефтерудовозы проектов 1553, 1570 и 15790 не имели вторых бортов и второго дна в районе нефтеналивных грузовых танков и по конструктивному типу корпуса могут быть отнесены к морским нефтерудовозам типа ОО (Ore/Oil carrier), что в свете нынешних требований экологической безопасности фактически делает невозможной их эксплуатацию в наши дни.

Немногочисленные проекты отечественных комбинированных судов внутреннего плавания советского периода представлены комбинированными судами пр. 414 и его модификациями типа СПН (было построено 81 судно), сухогрузно-наливными баржами-площадками проектов 81540, 81542 (было построено 4 судна) и Р93 (было построено 88 судов). Но основной проблемой вышеперечисленных проектов также является их несоответствие действующим требованиям Технического регламента о безопасности объектов внутреннего водного транспорта [18] в части отсутствия двухкорпусных корпусных конструкций в районе наливных танков.

В настоящее время только проект RST54 – автор Морское Инженерное Бюро, МИБ – (рис. 4), представленный серией из 7 построенных судов [8] [18] [19] [20] [21], отвечает всем современным требованиям, в том числе и Технического регламента. Характеристики отечественных проектов комбинированных судов внутреннего и смешанного (река–море) плавания приведены в таблице 3.



Рис. 4. Комбинированное судно проекта RST54

Таблица 3

**Характеристики реализованных отечественных проектов комбинированных судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания**

Тип и назначение	№ пр.	Класс	Количество построенных судов	L, м	B, м	H, м	Грузоподъемность, тонн	Тгр (море/река), м	Скорость, км/ч	Мощность ГД, кВт
Грузовой самоходный теплоход	RST54, МИБ	М-ПР2,5 (лед 30) А РРР	7	140,85	16,70	5,0	5745 (масса щебня на палубе – 4700 т)	3,52/3,6	20,37	2х1200
Грузовой самоходный теплоход	1553, тип «Нефтерудовоз»	«МЗ,0» Речного Регистра РСФСР	6	115,26	13,0	5,8	2700 (при загрузке нефтепродуктами и рудой); 1500 (при загрузке углем)	3,5/3,41	20,3	2х660
Грузовой самоходный теплоход	1570, тип «Нефтерудовоз»	«П СП» Морского Регистра	53	115,41	13,0	5,8	2700 (при загрузке нефтепродуктами и рудой); 1500 (при загрузке углем)	3,54/3,45	20,3	2х660
Грузовой самоходный теплоход	15790, тип «Нефтерудовоз»	«П СП» Морского Регистра	2	122,1	13,5	6,5	3610/3830 в море 2820/2800 в реке	3,7/4,1	20,4	2х700
Грузовой самоходный теплоход	414В, тип СПН	«О2,0» Речного Регистра РСФСР	43	63,6	10,0	2,0	600 (при перевозке сухих грузов и дизельного топлива в разряде «Р»); 540 (при перевозке бензина в разряде «О»).	1,58 (в разряде «О») 1,64 (в разряде «Р»)	17	2х272
Грузовой самоходный теплоход	414Б, 414Н, тип СПН	«О2,0» Речного Регистра РСФСР	414Б-18; 414Н-20	63,14	10,0	2,0	600 (сухие грузы); 600 (налив)	1,55	15,2	2х180
Сухогрузно-наливная баржа-площадка	81540	«О2,0 (лед)» Речного Регистра РСФСР	3	75,54	14,0	2,5	1600	2,1	-	Нет
Сухогрузно-наливная баржа-площадка	81542	«О2,0 (лед)» Речного Регистра РСФСР	1	75,54	14,0	2,5	1600 (сухие грузы); 980 (налив).	2,1 (сухие грузы)	-	Нет
Сухогрузно-наливная баржа-площадка	P93	«Р1,2» Речного Регистра РСФСР	88	47,0	12,0	1,8	400 (налив); 640 (сухие грузы).	1,55	-	нет

Следует констатировать, что потребность в комбинированных судах внутреннего и смешанного (река-море) плавания есть, и в условиях рыночной экономики еще больше возрастает. Так, например, разработка Оленегорского железорудного месторождения в Мурманской области, начатая в середине прошлого века, ведется и расширяется. Используется 6 открытых карьеров, на которых ежегодно добывается более 500 млн. т руды [22]. То есть, грузовая база для нефтерудовозов типа 1553, 1570 и 15790 есть и сохранилась, но нет судов, отвечающих современным требованиям, и грузы были переориентированы на другие виды транспорта, прежде всего, железнодорожный, хотя экономически это не всегда оправдано. Так, по данным МИБа, если принять за 1 топливо, необходимое для перевозки на судне 1 т груза на 1 км, то для перевозки этого же груза по железной дороге количество необходимого топлива составляет не менее 1.4, а на автотранспорте – не менее 3.7 единиц.

Кроме того, в современных экономических условиях грузопотоки не могут являться стабильными, постоянными и неизменными.

Например, в 2018–2019 г., в связи с изменением тарифов на перевозки железнодорожным транспортом в Российской Федерации произошло серьезное снижение объемов востребованности перевозок нефтеналивных грузов судами внутреннего и смешанного (река-море) плавания [23]. На фоне этой ситуации судоходная компания «Волжское пароходство» осуществила переоборудование трех танкеров проекта 05074Т типа «Волга-Флот» в сухогрузные суда дедвейтом 5450 тонн, предназначенные для перевозок генеральных и насыпных грузов, включая зерно, лес, гранулированную серу [24], [25]. В то же время отметим, что теплоходы типа XXVI Съезд КПСС или Волжский (пр. 05074, 05074М и 05074А) изначально проектировались ЦКБ «Вымпел» и строились именно в качестве сухогрузных судов, а потом дважды переоборудовались. Этот реальный пример показывает необходимость в комбинированных судах не только с точки зрения повышения экономической эффективности танкеров за счет обратной загрузки, но и демонстрирует актуальность судна, способного перевозить разного рода грузы (сухие и жидкие), в условиях нестабильности грузопотоков, а также возможность его адаптации под быстро меняющуюся конъюнктуру рынка.

### **Выводы и заключение**

Учитывая средний возраст грузовых судов, а также меры, предпринимаемые правительством страны, направленные на качественное изменение состояния внутреннего водного транспорта, обеспечение потенциала для реальной конкуренции с наземными видами транспорта, встает задача технико-экономического обоснования потребности в комбинированных судах, их архитектурно-конструктивных типов, оптимальных элементов и характеристик.

В отечественной литературе достаточно много публикаций, посвященных особенностям проектирования специализированных грузовых судов – нефтеналивных и сухогрузных. Однако отсутствуют какие-либо обобщения и исследования по вопросам определения характеристик и элементов комбинированных судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания. В работах [6] и [26] в основном дается анализ характеристик комбинированного (нефтерудовоз) судна неограниченного плавания «Маршал Будённый» проект В-524 и сопоставление его с зарубежными проектами судов того периода. В работе [27] Николаевского кораблестроительного института рассмотрены особенности проектирования корпуса морских судов для навалочных грузов и нефти. В работе [28] впервые предпринята интересная попытка обосновать важнейшую характеристику комбинированного судна – соотношение грузоподъемностей по наливному и сухому грузу (контейнерам) в зависимости от фрахта за прямой и обратный грузы. Однако рассматривается только одна схема конструктивного типа корпуса и принят ряд допущений, которые могут повлиять на полученные выводы.

Методика решения задачи оптимизации комбинированных судов в настоящее время практически отсутствует и должна решаться с использованием алгоритмов и программного обеспечения, разработанных на основе математического моделирования конструкции этих судов различных архитектурно-конструктивных типов, оценку их мореходных качеств, расчет технико-эксплуатационных и экономических показателей постройки и работы судна на линии.

#### Список литературы:

1. Федеральное агентство морского и речного транспорта. Информационный буклет. Оригинал-макет ООО «ИД Магистраль», Москва, 2019 г.
2. Егоров Г.В. Прогноз состава флота судов смешанного «река-море» плавания до 2025 года с определением наиболее востребованных типов судов /Егоров Г.В., Егоров А.Г.// Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: с. 169–178.
3. Burneett A. To own a combination ship. «Marine design international», march 26, 1971, p. 19.
4. Dorman W. Combination bulk carriers. «Marine technology», 1966, N4, p. 409–453.
5. Marie Douet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy & Management, 1999, VOL. 26, NO. 3, p. 231–248.
6. Железяков Ж.К. Комбинированные суда для перевозки нефти и навалочных грузов / Железяков Ж.К. // Ленинград, «Судостроение», 1976 г.
7. Козлов С.М. Головной крупнотоннажный нефтерудовоз «Борис Бутома». /Козлов С.М., Цыбенко А. Ф.// журнал «Судостроение», № 12, 1977 г.
8. Технический регламент о безопасности объектов морского транспорта Российской Федерации, постановление Правительства Российской Федерации от 12 августа 2010 г. № 620.
9. ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Правила классификации и постройки морских судов. Санкт-Петербург, 2019 г.
10. ФАУ «Российский Речной Регистр». Правила классификации и постройки судов. Москва, 2019 г.
11. Светлов И.Б. Концептуальный проект организации на Дальнем Востоке Российской Федерации импортозамещающего производства судового и энергетического оборудования на базе Хабаровского газотурбинного завода /Светлов И.Б., Савин С.Ю.// АНО «Центр стратегических исследований топливно-энергетического комплекса Дальнего Востока», 2015 г.
12. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г, измененная протоколом 1978 г. к ней (МК МАРПОЛ 73/78), ЗАО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, 2012 г.
13. Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd (DNV-GL). Rules for Classification of Ships [Электронный ресурс] // rules.dnvgl.com URL: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/ru-ship/2019-07/dnvgl-ru-ship-pt1ch2.pdf> (дата обращения 27.11.2019)
14. Report of the Commission on American Shipbuilding, Volume III, Annexes IA-IE. United States Commission on American Shipbuilding, 1973, p. 684
15. Halle P. Hatch cover installation on OBO carriers – most important feature. «Zosen», N2, p. 30.
16. Животовский А.А. Особенности конструкции головного теплохода «Нефтерудовоз-1» /Животовский А.А., Шалкин М.К., Самунин В.Г.// журнал «Судостроение», № 5, 1971 г.
17. Справочники по серийным транспортным судам. Издательство «Транспорт», Москва
18. Технический регламент о безопасности объектов внутреннего водного транспорта Российской Федерации, постановление Правительства Российской Федерации от 12 августа 2010 г. № 623.
19. Егоров Г.В. «Сверхполные» комбинированные суда проекта RST54 для перевозки нефтепродуктов и сухих грузов, а также контейнеров, накатной техники и проектных грузов /Егоров Г.В., Тонюк В.И., Дурнев Е.Ю.// ООО «Морское инженерное бюро», журнал «Судостроение», № 4, 2017 г.
20. Егоров Г.В. Основные решения нового поколения «сверхполных» грузовых судов смешанного (река-море) и внутреннего плавания. /Егоров Г.В., Егоров А.Г.// ООО «Морское инженерное бюро», журнал «Судостроение», № 4, 2018 г.
21. Егоров Г.В. Обоснование главных параметров комбинированных судов смешанного (река-море) плавания для перевозки нефтепродуктов, навалочных грузов, контейнеров, накатной техники и негабаритов. /Егоров Г.В., Тонюк В.И., Ворона О.А., Бутенко Н.В.// Вестник Одесского национального морского университета, № 3 (52), 2017 г.
22. АО «Олкон» – ПАО «Северсталь» [Электронный ресурс] URL: <https://olcon.ru/>

23. Танкеры притопило железнодорожными скидками [Электронный ресурс] // kommersant.ru, статья, газета «Коммерсантъ» №38 от 04.03.2019, стр. 7, URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3902565> (дата обращения 27.11.2019)
24. Волжское пароходство завершило конверсию трех танкеров в многоцелевые сухогрузные суда [Электронный ресурс] // volgaflot.com: статья, 25.10.2019 г, АО «Судоходная компания «Волжское пароходство» URL: <http://www.volgaflot.com/o-kompanii/novosti/volzhskoe-parokhodstvo-zavershilo-konversiyu-trekh/> (дата обращения 27.11.2019)
25. Из танкеров – в сухогрузы. Статья. Отраслевая газета «Водный транспорт», № 11 (13005) от 15 ноября 2019 г.
26. Железяков Ж.К. Определение элементов крупнотоннажных комбинированных судов / Железяков Ж. К. // журнал «Судостроение», № 6, июнь 1972 г.
27. Цыбенко Н.А. Проектирование корпусных конструкций судов для навалочных грузов и судов для навалочных грузов и нефти /Цыбенко Н.А.// автореферат на соискание ученой степени к.т.н., Николаевский кораблестроительный институт, Николаев, 1986 г.
28. Кочнев Ю.А. Обоснование целесообразности постройки комбинированного судна «танкер-контейнеровоз» /Кочнев Ю.А., Масленников А.В.// Вестник ВГУВТ, № 28, 2010.

## CLASSIFICATION AND DESIGN FEATURES OF COMBINED SHIPS

**Илья А. Gulyaev,**

*Federal Autonomous Institution «Russian River Register», Moscow, Russia*

**Evgeniy P. Ronnov,**

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

*Abstract. This article presents a modern classification of sea-going combined ships of unrestricted navigation according to their type and purpose; as well as provides the review and analysis of national designs of combined restricted, inland and river-sea navigation ships in service and their characteristics. A review of the studies in the field of optimization and justification of key components and characteristics of combined ships is given. Apart from that, this article proposes a solution of the task aimed at optimization of combined ships' components and characteristics by means of methods and software to be developed on the basis of mathematical modeling of a ship design for different types.*

*Keywords: combined ship, inland navigation ship, river-sea-going ship, ore-oil tanker, ballast (empty) passages, liquid bulk cargoes, bulk dry cargoes, ship classification, type and purpose, components and characteristics optimization.*

### References:

1. Federal Agency for Maritime and River Transport. Transport Reviews. 2019.
2. Egorov G.V. Egorov A.G. Prediction of river-sea fleet composition up to 2025 with identification of the most needed ship types. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2018; Special'nyj vypusk 2: s. 169–178.
3. Burneett A. To own a combination ship. «Marine design international», march 26, 1971, p. 19.
4. Dorman W. Combination bulk carriers. «Marine technology», 1966, N4, p. 409-453.
5. Marie Douet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy & Management, 1999, VOL. 26, NO. 3, p. 231-248.
6. Zhelezjakov Zh. K. Kombinirovannye suda dlja perevozki nefiti i navalochnyh грузов. Leningrad, «Sudostroenie», 1976.
7. Kozlov S.M. Cybenko A.F. Golovnoj krupnotonnazhnyj nefterudovoz «Boris Butoma», zhurnal «Sudostroenie», No 12, 1977.
8. Technical Regulations on the Safety of Sea Transport Objects.
9. FAI « Russian Maritime Register of Shipping». Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Saint-Petersburg, 2019.
10. FAI «Russian River Register». Rules for the Classification and Construction. Moscow, 2019.
11. Svetlov I.B. Savin S.J. Konceptual'nyj proekt organizacii na Dal'nem Vostoke Rossijskoj Federacii importozameshchajushhego proizvodstva sudovogo i jenergeticheskogo oborudovanija na baze Haba-

- rovskogo gazoturbinnogo zavoda. ANO «Centr strategicheskikh issledovanij toplivno-jenergeticheskogo kompleksa Dal'nego Vostoka», 2015.
12. International Convention for prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL 73/78)
13. Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd (DNV-GL). Rules for Classification of Ships [Electronic resource] rules.dnvgl.com URL: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/ru-ship/2019-07/dnvgl-ru-ship-pt1ch2.pdf> (Accessed on: 27.11.2019)
14. Report of the Commission on American Shipbuilding, Volume III, Annexes IA-IE. United States Commission on American Shipbuilding, 1973, p. 684
15. Halle P. Hatch cover installation on OBO carriers – most important feature. «Zosen», N2, p. 30.
16. Zhivotovskij A.A. Shalkin M.K. Samunin V.G. Osobennosti konstrukcii golovnogo teplohoda «Neftnerudovoz-1», zhurnal «Sudostroenie», No 5, 1971.
17. Spravochniki po serijnym transportnym sudam. Izdatel'stvo «Transport», Moskva
18. Technical Regulations on the Safety of Inland Water Transport Objects.
19. Egorov G.V. Tonyuk V.I., Durnev E.Y. «Saturated» multi-purpose P.RST54 ships for transportation of oil and dry cargo, as containers, rolling equipment and special-purpose cargo and other containers. Marine Engineering Bureau, zhurnal «Sudostroenie», No 4, 2017.
20. Egorov G.V. Egorov A.G. Main solutions for the new generation of «superfull hull line» cargo ships of mixed (river-sea) and internal navigation. Marine Engineering Bureau, journal «Sudostroenie», No 4, 2018.
21. Egorov G.V. Tonjuk V.I., Vorona O.A., Butenko N.V. Obosnovanie glavnykh parametrov kombinirovannykh sudov smeshannogo (reka-more) plavanija dlja perevozki nefteproduktov, navalochnykh gruzov, kontejnerov, nakatnoj tehniki i negabaritov. Vestnik Odesskogo nacional'nogo morskogo universiteta, No 3 (52), 2017.
22. JSC «Olkon» – PJSC «Severstal» [Electronic resource] URL: <https://olcon.ru/>
23. Tankery pritopilo zheleznodorozhnymi skidkami [Electronic resource] kommersant.ru, URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3902565> (Accessed on: 27.11.2019)
24. Volzhskoe parohodstvo zavershilo konversiju trekh tankerov v mnogocelovye suhogruzyne suda [Electronic resource] volgaflot.com URL: <http://www.volgaflot.com/o-kompanii/novosti/volzhskoe-parokhodstvo-zavershilo-konversiyu-trekh/> (Accessed on: 27.11.2019)
25. Iz tankerov – v suhogruzy. Stat'ja. Otraselevaja gazeta «Vodnyj transport», No 11 (13005), 2019.
26. Zhelezjakov Zh.K. Opredelenie jelementov krupnotonnazhnykh kombinirovannykh sudov. zhurnal «Sudostroenie», No 6, 1972.
27. Cybenko N.A. Proektirovanie korpusnykh konstrukcij sudov dlja navalochnykh gruzov i sudov dlja navalochnykh gruzov i nefiti, avtoreferat, Nikolaevskij korablestroitel'nyj institut, Nikolaev, 1986.
28. Kochnev J.A. Maslennikov A.V. Expediency substantiation of the construction of the combined vessel the tanker-container carrier, Vestnik VGUVT, No 28, 2010.

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

**Илья Александрович Гуляев**, начальник корпусного отдела, ФАУ «Российский Речной Регистр», 105187, Москва, Окружной проезд, 15, корп. 2, e-mail: [guliaev@rivrereg.ru](mailto:guliaev@rivrereg.ru)

**Евгений Павлович Роннов**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [priemnaya@vgavt-nn.ru](mailto:priemnaya@vgavt-nn.ru)

**Илья А. Gulyaev**, Head of Hull Department, Federal Autonomous Institution «Russian River Register», bld. 2, 15, Okružhnoy proezd, Moscow, Russia, 105187

**Evgeniy P. Ronnov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950

Статья поступила в редакцию 27.12.2019 г.

УДК 629.123

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.39>

## МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ СОСТАВНОГО КРЫЛА ЭКРАНОПЛАНА 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), г. Москва, Россия

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

*Ключевые слова:* экраноплан, аэродинамические коэффициенты, метод, коэффициент подъемной силы, составное крыло, шайбы

*Аннотация.* Одной из важнейших проблем в проектировании и обосновании технических характеристик экранопланной техники является поиск оптимальных значений аэродинамических и моментных коэффициентов и их соотношений, обеспечивающих не только выполнение технического задания, но и безопасную эксплуатацию в рамках норм АП и правил эксплуатации водного транспорта.

Данная статья посвящена методу расчета коэффициента подъемной силы  $C_y$  сложного составного крыла с шайбами при помощи использования метода суперпозиции и верификации расчетных данных с экспериментальными значениями. За основу исследования были взяты характеристики профиля крыла ЦАГИ-876 на различных относительных высотах полета.

Определение аэродинамического коэффициента  $C_y$  выполняется в несколько этапов:

– расчет аэродинамического коэффициента  $C_y$  центроплана;

– расчет аэродинамического коэффициента  $C_y$  консоли;

– расчет суммарного коэффициента  $C_y$  путем использования метода суперпозиции.

Данный подход обеспечивает расчетную точность до 93%, что можно считать удовлетворительным результатом в рамках использования данной методологии в предварительном проектировании экранопланов типов «В» и «С».

### Основные обозначения

$S_{AX}$  – средняя аэродинамическая хорда крыла

$C_y$  – коэффициент подъемной силы крыла

$C_{xi}$  – коэффициент индуктивного сопротивления

$C_{y_{сумм}}$  – суммарный коэффициент подъемной силы крыла

$C_{y_{ц}}$  – коэффициент подъемной силы центроплана

$C_{y_{к}}$  – коэффициент подъемной силы консоли

$S_{сумм}$  – суммарная площадь крыла экраноплана

$S_1$  – площадь центроплана

$S_2$  – площадь консолей

$\lambda$  – удлинение крыла

- $\bar{c}$  – относительная толщина профиля крыла  
 $\bar{h}_{ш}$  – относительная высота шайбы  
 $\Delta C_y(\bar{h}, \alpha)$  – прибавочный коэффициент подъемной силы крыла  
 $C_{y_i}$  – коэффициент подъемной силы крыла экраноплана в зоне действия экранного эффекта  
 $C_{y_{\infty}}$  – коэффициент подъемной силы в невозмущенном воздушном потоке  
 $\alpha_{кр}$  – критический угол атаки  
 $k_{\lambda}$  – коэффициент, зависящий от удлинения крыла  
 $k_{\bar{h}}$  – коэффициент, зависящий от относительной высоты полета экраноплана  
 $k_{np}$  – коэффициент, зависящий от формы профиля крыла  
 $\alpha$  – текущий угол атаки  
 $\alpha_{пл}$  – угол атаки пересечения линий  
 $C_y^a$  – коэффициент подъемной силы по углу атаки  
 $p$  – периметр крыла  
 $l$  – размах крыла  
 $\lambda_{экв}$  – эквивалентное удлинение крыла  
 $\bar{h}$  – относительная высота полета  
 $\bar{x}_2$  – точка конца прямолинейного участка нижней дужки профиля  
 $\bar{x}_1$  – точка начала прямолинейного участка нижней дужки профиля  
 $C_{y_{max\ кр}}$  – коэффициент подъемной силы на критическом угле атаки в зоне действия экранного эффекта  
 $\alpha_0$  – угол атаки нулевой подъемной силы  
 $k_1$  – коэффициент, зависящий стреловидности крыла и относительной толщины профиля  
 $k_2$  – коэффициент, зависящий от сужения крыла  
 $C_{y_{max}}$  – коэффициент подъемной силы на критическом угле атаки в невозмущенном потоке  
 $\chi_{лх}$  – угол стреловидности передней кромки крыла  
 $\eta$  – относительное сужение крыла

### Введение

Выполненный анализ исследований в области проектирования экранопланов показал, что этап предварительного проектирования на сегодняшний день является недостаточно методически проработанным этапом внутреннего проектирования. Подавляющее большинство работ в этой области направлено либо на обобщение информации по истории развития и разработки экранопланов [1–3], либо представляют собой узконаправленные исследования, в основном, в области аэродинамики, малопригодные для использования при проектировании экранопланов. В работах [4–8] приведены методы, позволяющие рассчитать или оценить отдельные характеристики экранопланов, в частности, методологические подходы к расчету аэродинамических коэффициентов подъемной силы и сопротивления  $C_y$  и  $C_x$ . В частности, работы J.D. Anderson, M.Tavakoli, Амплитова П.А., Суржика В.В. включают в себя объяснение влияния экранного эффекта на аэродинамические характеристики; в них также приводятся полуэмпирические формулы для расчетов аэродинамических характеристик. Приведенные статьи относятся преимущественно к аэродинамике экранопланов типа «А», а экранопланы типов «В» и «С» упоминаются только вскользь в источниках [1], [2], [9], как правило, с точки зрения перспектив применения.

В настоящее время большое количество экранопланостроительных предприятий занимаются разработкой экранопланов типов «А» и «В» сравнительно небольших размерностей и массой до 20 тонн. Однако, исследования, проведенные например, компанией Boeing, показали, что наиболее перспективным направлением развития экранопланостроения являются экранопланы типа «С» аэродромного базирования. Более подробно преимущества и недостатки данного типа экранопланов описаны в работе [10].

Можно сделать вывод о том, что имеющиеся материалы по проектированию экранопланов типа «С» не систематизированы и не мало пригодны к использованию, а проблема методического обеспечения предварительного этапа проектирования экранопланов типа «С» является актуальной.

### **1. Постановка задачи**

Наименее проработанным вопросом при расчете характеристик экранопланов можно считать определение аэродинамических характеристик его крыла, в частности, коэффициента подъемной силы  $C_y$  и коэффициента индуктивного сопротивления  $C_{xi}$  на режимах полета в зоне действия экрана. В работах [6], [7], [11–13] приведены различные методы расчета аэродинамических характеристик крыла экраноплана. Однако при анализе различных источников не было обнаружено методов определения коэффициента подъемной силы  $C_y$  сложного составного крыла экраноплана.

Каждая часть крыла (центропланная и консольные) создают различные подъемные силы ввиду различных геометрических форм крыла, наличия боковых шайб, относительных высот движения. Проанализированные методики не позволяют определить значения  $C_y$  крыла как единой системы. Предполагается, что для расчета коэффициента подъемной силы в зоне действия экрана может быть использован метод суперпозиции крыла, однако в литературе по расчету аэродинамических характеристик экранопланов отсутствует упоминание об использовании данного метода. Поэтому в качестве цели проведенной работы была поставлена задача проверка работоспособности метода суперпозиции для получения суммарного коэффициента подъемной силы  $C_{y\text{сумм}}$  при сложении расчетных коэффициентов подъемной силы  $C_{y\text{ц}}$  центропланной части крыла и коэффициента подъемной силы  $C_{y\text{к}}$  консольной части крыла.

Для расчета коэффициентов подъемной силы центроплана использовались методы, изложенные в работе [6]. Для консольной части крыла коэффициенты были приняты равными их значениям в невозмущенном потоке [14].

### **2. Граничные условия**

Исследование выполнялось для профилей крыла ЦАГИ-876 центроплана и консольных частей, аэродинамические характеристики которых в невозмущенном потоке представлены на рисунках 1 и 2.

В работе было выполнено сравнение расчетных значений коэффициента  $C_y$  составного крыла со значениями, полученными на основе продувок в аэродинамической трубе ЦАГИ. Описание испытаний в аэродинамической трубе представлено в работе [15].

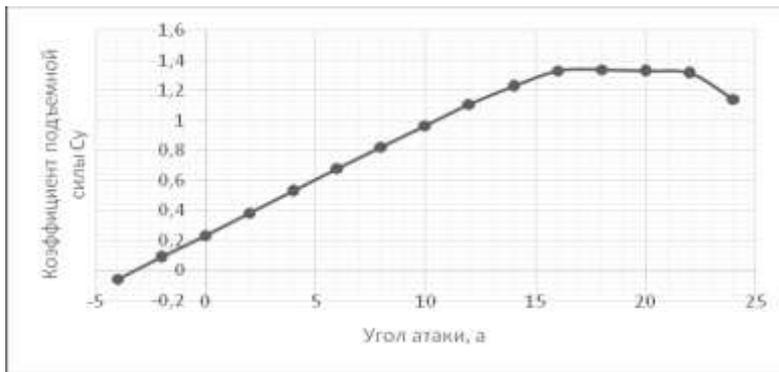


Рис. 1. Зависимость коэффициента подъемной силы профиля  $C_L$  от угла атаки

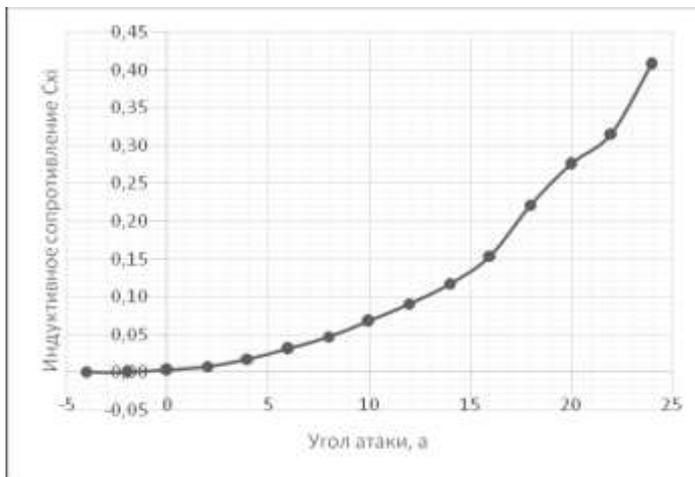


Рис. 2. Зависимость коэффициента индуктивного сопротивления профиля  $C_{xi}$  от угла атаки



Рис. 3. Форма профиля крыла

Геометрические ограничения сложного крыла:

- удлинение центропланной части крыла  $\lambda=3,1$ ;
- удлинение всей несущей системы принято равным  $\lambda=4,8$ ;
- центроплан и консольные части крыла имеют прямоугольную форму с относительной толщиной профиля крыла  $\bar{c} = 0,09$  ;
- угол поперечного наклона крыла центропланной части крыла принят равным - 5 градусов;
- угол поперечного наклона крыла консольной части крыла принят равным 15 градусов ввиду обеспечения безопасности маневров экраноплана;
- относительная высота шайб, установленных на законцовках центропланной части крыла, принимаем равной  $\bar{h}_{ш} = 0,1$ .

- значения относительных высот полета относительно САХ центропланной части крыла экраноплана принимаем следующие: 0,127, 0,17, 0,25, 0,42, 0,64, 0,85, 1,3.
  - исходя из условий 4 и 6, относительные высоты полета консольных частей крыла приняты равными: 0,35, 0,46, 0,64, 1, 1,5, 2, 3.
  - исследуемый диапазон углов атаки крыла – от 0 до 18 градусов.
- Общий вид модели крыла приведен на рисунке 4.

### 3. Описание расчетного метода

В работах [6], [7], [11–13] представлены различные подходы к расчету коэффициента подъемной силы  $C_y$  крыла вблизи экрана. Наиболее подходящим по точности получаемых результатов расчетов является метод, изложенный в источнике [6]. Он обладает высокой точностью расчетов (погрешность до 5%) на углах атаки до 6 градусов, но на околокритических углах атаки погрешность расчета превышает 16%.



Рис. 4. Общий вид крыла экраноплана [15].

Для повышения точности расчетной методики в нее были внесены некоторые изменения. Значение критического угла атаки  $\alpha_{кр}$  в работе [6] рассчитывалось по выражению (1):

$$\alpha_{кр} = \frac{C_{y \max кр}}{C_y^a} + \alpha_0 + 1 \quad (1)$$

где

$$C_{y \max кр} = k_1 k_2 C_{y \max} \quad (2)$$

$$k_1 = 0.9 + 0.4 \operatorname{tg}[2.5(2 - 22\bar{c})] * (\sin \chi_{нк})^2 \quad (3)$$

$$k_2 = 0.89 + 0.26 * \frac{1.2 - \frac{1}{\eta}}{\eta} \quad (4)$$

Значение коэффициента подъемной силы крыла в зоне действия экранного эффекта  $C_{y \max кр}$  при его расчете через выражение (3) получается меньше, чем в невозмущенном потоке, что противоречит ряду проведенных продувочных испытаний, описанных в работах [3], [7], [16], и в свою очередь приводит к увеличению погрешности значений коэффициента подъемной силы крыла от экспериментальных значений до 15–16% (рис. 5, 6).

Изменение значений  $C_{y \max \text{ кр}}$  по мере уменьшения относительной высоты полета приводит только к увеличению критического значения коэффициента подъемной силы, поэтому в рамках данной работы значение  $C_{y \max \text{ кр}}$  принималось равным  $C_{y \max}$ .

Определение значений  $C_y$  в зоне действия эффекта экрана составного крыла выполнялось в три этапа:

1. Расчет коэффициента крыла подъемной силы  $C_{y \text{ цп}}$  центроплана;
2. Расчет коэффициента крыла подъемной силы  $C_{y \text{ кч}}$  консольной части крыла;
3. Суммирование значений коэффициентов подъемной силы крыла  $C_y$  с помощью метода суперпозиции:

$$C_{y \text{ сумм}} = \frac{C_{y \text{ к}} S_1 + C_{y \text{ ц}} S_2}{S_1 + S_2} \quad (5)$$

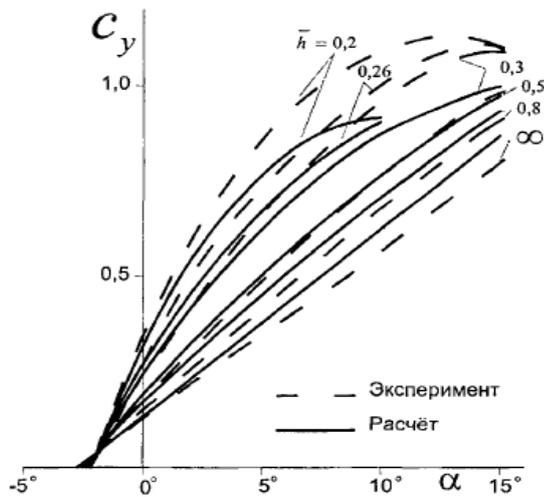


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные значения коэффициента подъемной силы крыла [6].

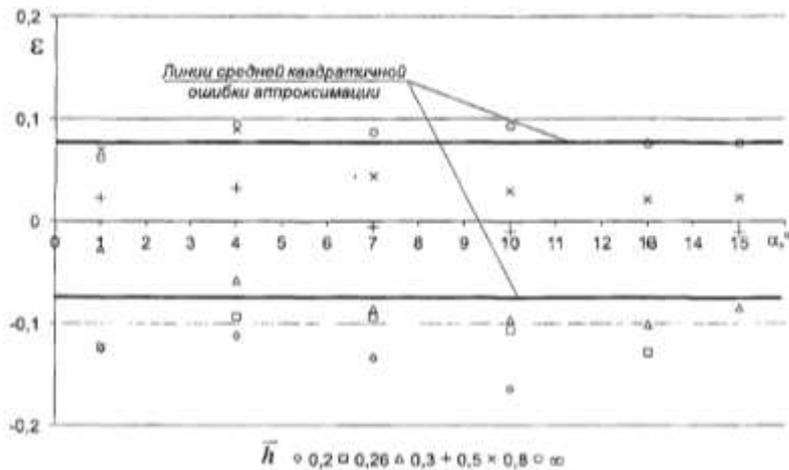


Рис. 6. Относительная погрешность определения коэффициента подъемной силы крыла [6].

Расчет значений коэффициентов подъемной силы  $C_y$  выполнялся через прибавочный коэффициент  $\Delta C_y(\bar{h}, \alpha)$ . Полное значение коэффициента подъемной силы крыла  $C_{yi}$  определялось по формулам:

$$C_{yi} = C_{y\infty} + \Delta C_{yкр}(\bar{h}, \alpha) \quad (6)$$

где  $\Delta C_{yкр}(\bar{h}, \alpha)$  рассчитывается по следующей группе формул: надо расписать словами что получаем по каждой из формул

$$\Delta C_{yкр}(\bar{h}, \alpha) = \frac{0,1}{(\alpha_{кр} - 4)} k_\lambda k_h k_{np} (\alpha_{кр} - \alpha + \alpha_{пл})(\alpha - \alpha_{пл}) \quad (7)$$

где учет влияния удлинения крыла можно записать через выражение (9), влияние относительной высоты полета – (11) и влияние формы нижней дужки профиля – (12):

$$k_\lambda = -100,125(C_y^\alpha)^2 + 23,72C_y^\alpha - 0,398 \quad (8)$$

$$C_y^\alpha = \frac{0,11\lambda_{экв}}{0,5 * \frac{P}{l} \lambda_{экв} + f(\lambda_{экв})} \quad (9)$$

$$f(\lambda_{экв}) = 2,5 - \frac{1}{\sqrt{\lambda_{экв}}} \quad (10)$$

$$k_h = 0,098\bar{h}^{-1,1} \quad (11)$$

$$k_{np} = 0,5(1 + (\bar{x}_2 - \bar{x}_1)) \quad (12)$$

#### **4. Расчет аэродинамических характеристик крыла и сравнение расчетных данных с экспериментальными**

По приведенным выше формулам были рассчитаны коэффициенты подъемной силы центропланной и консольных частей экраноплана; по формуле (6) были получены значения суммарного коэффициента подъемной силы крыла.

В таблице 1 представлены погрешности для каждого значения относительной высоты полета общей крыльевой системы с учетом ограничений, представленных в разделе 3.

Значения погрешностей были определены путем сравнения экспериментальных значений коэффициентов  $C_{yi}$  составного крыла в зоне действия эффекта экрана и расчетных значений.

Таблицы погрешностей построены для следующих относительных высот полета: 0,15, 0,2, 0,3, 0,5, 0,75, 1 и 1,5 единицы. Данные значения относительных высот полета относятся непосредственно к составному крылу в целом.

На рис. 7 приведено графическое распределение значений погрешности для различных относительных высот полета.

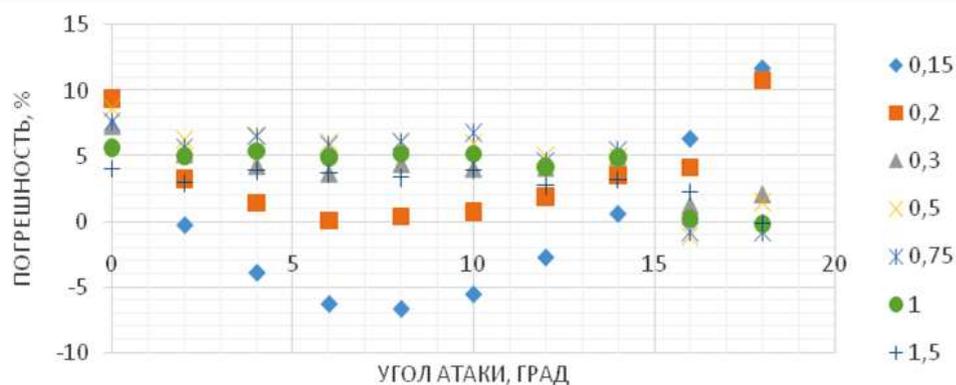


Рис. 7. Графическое распределение погрешности

Таблица 1.

Таблица погрешностей

		Угол атаки, град									
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Относительная высота полета	0,15		-0,13	-3,79	-6,23	-6,69	-5,67	-2,96	0,23	5,81	10,9
	0,2	9,41	3,24	1,44	0,11	0,39	0,77	1,91	3,51	4,13	10,78
	0,3	7,28	5,12	4,24	3,65	4,37	4,02	4,1	4,9	1,24	2,07
	0,5	8,66	6,28	6,55	6,05	6,09	5,95	5,02	4,92	-1,14	1,47
	0,75	7,68	5,74	6,57	5,9	6,16	6,84	4,71	5,5	-0,78	-0,74
	1	5,63	4,96	5,36	4,89	5,15	5,15	4,17	4,87	0,24	-0,21
	1,5	4	2,93	3,89	3,66	3,37	3,94	2,73	3,2	2,26	-0,11

### Результаты работы и выводы

Основным результатом данной работы является обоснование возможности применения метода суперпозиции при определении коэффициента подъемной силы сложного составного крыла с шайбами с точностью до 7%.

Стоит принять во внимание (рис. 8), что точность по мере уменьшения относительной высоты полета падает, и наиболее точные результаты получаются в диапазоне относительных высот от 0,5 до 1. Значения для углов атаки  $\alpha_{кр}$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_{пл}$  полностью совпадают со значениями, полученными экспериментальным методом.

Использование в качестве критического значения коэффициента подъемной силы на экране  $C_{y \max \text{ кр}}$  равным коэффициенту подъемной силы  $C_{y \max}$  в невозмущенном воздушном потоке приводит к повышению точности получаемых результатов во всем рабочем диапазоне углов атаки с максимальной погрешностью 7% против 16% базовой методологии.

Метод расчета коэффициентов подъемной силы и метод суперпозиции могут быть использованы для расчета аэродинамических характеристик в зоне действия эффекта экрана на этапе предварительного проектирования экраноплана, что позволит сократить количество экспериментов в опытовом бассейне или гидрлотке, а также снизить финансовые и временные затраты на обоснование оптимальной компоновки экраноплана.

**Список литературы:**

1. Jia, Q., Yang, W., Yang, Z. Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect, Tongji University, Shanghai, China, 2016.
2. L. Yun, A. Bliault, J. Doo, WIG Craft and Ekranoplan, Springer, New York, 2010.
3. Белавин Н. И. Экранопланы // Ленинград. Судостроение. 1977 – 227 с.
4. J.D. Anderson, Aircraft Performance and Design, McGraw–Hill, New York, 1999.
5. 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.
6. 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.
7. Суржик В.В., Методы структурно-параметрического синтеза математических моделей экранопланов, Иркутский государственный университет путей сообщения ИрГУПС, Иркутск, Россия, 2010.
8. Мусатов, Р.А. Особенности влияния удлинения прямоугольных крыльев на аэродинамические характеристики вблизи экрана / Р.А. Мусатов // Сборник докладов конференции Геленджик-2002. – М.: Типография ЦАГИ, 2002. – С. 273-280.
9. Alexander Nebylov, Vladimir Nebylov, Pierre FABRE, WIG –Craft Flight Control Above The Waved Sea, State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia.
10. Панченков А.Н. Экспертиза экранопланов / А.Н. Панченков, П.Т. Драчев, В.И. Любимов. – Н.Новгород: ВГАВТ, 2006. – 520с.
11. P.J. Mantle, Induced drag of wings in ground effect, Vashon, Washington USA, 2016
12. 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.
13. M. Tavakoli Dakhrabadi, M.S. Seif, A practical method for aerodynamic investigation of WIG, Int. J. Aircr. Eng. Aerosp. Technol, 2016.
14. Ширманов П.М. Атлас аэродинамических характеристик авиационных профилей. Москва : Гос. авиационное и автотракторн. изд-во, 1932.
15. Абдуллин А.А. Аэродинамические характеристики и продольная устойчивость схематизированной модели экраноплана самолетной схемы на крейсерском режиме полета// Сборник докладов конференции Геленджик-2016. – М.: Типография ЦАГИ, 2016. – С. 94-98.
16. Визель Е.П., Григорьев А.А., Захарченко Ю.А. Аэродинамика экранопланов самолётной схемы с комбинированными несущими поверхностями// Техника воздушного флота. М.: Типография ЦАГИ, 2014.

**Luchkov A.N., Cheban E.Yu., Zhuravlev E.V.**

## **METHOD OF CALCULATING THE LIFT COEFFICIENT FOR A WIG'S COMPOUND WING FLYING CLOSE TO THE GROUND**

**A.N. Luchkov**

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

**E.Yu. Cheban**

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

**E.V. Zhuravlev**

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

*Abstract. In the design and characteristics justification of WIG crafts, determination of optimal aerodynamic and moment coefficients and their ratio is still one of the most important problems. Values and ratios of these coefficients provide not only technical tasks performance, but also safe operation of a WIG craft within the framework of AP standards and rules of water transport operation.*

*The paper is devoted to the method of calculating the  $C_y$  lift coefficient for the complex compound wing with washers by using the superposition method and verification of calculated data with experimental values. The study was based on TsAGI-876 wing profile characteristics at various relative flight heights.*

*Calculation of the aerodynamic  $C_y$  coefficient is performed in several stages:*

- 1. Calculation of the aerodynamic  $C_y$  coefficient for the center section;*
- 2. Calculation of aerodynamic  $C_y$  coefficient for the console section;*
- 3. Calculation of the total  $C_y$  coefficient by using the superposition method.*

*The proposed method of calculation provides an accuracy of up to 93%, which can be considered a satisfactory result for preliminary design of types «B» and «C» WIG crafts.*

*Key words: WIG craft, aerodynamic coefficients, calculation method, lift coefficient, compound wing, washers*

## References

1. Jia, Q., Yang, W., Yang, Z. Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect, Tongji University, Shanghai, China, 2016.
2. L. Yun, A. Bliault, J. Doo, WIG Craft and Ekranoplan, Springer, New York, 2010.
3. Belavin N. I. Ekranoplani // Leningrad. Sudostroenie. 1977 – 227 s.
4. J.D. Anderson, Aircraft Performance and Design, McGraw–Hill, New York, 1999.
5. 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.
6. Amplitov P.A., Feoktistov S.I., Vliyanie geometricheskikh parametrov ekranoplana tipa A na ego vesu\_vie i ekonomicheskie harakteristiki, Komsomolskii na Amure gosudarstvennii tehnikeskii universitet, Komsomolsk na Amure, Rossiya, 2013.
7. Surzhik V.V., Metody strukturno-parametricheskogo sinteza matematicheskikh modelej ekranoplanov, Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya IrGUPS, Irkutsk, Rossiya, 2010.
8. Musatov, R.A. Osobennosti vliyaniya udlineniya pryamougol'nykh kryl'ev na aerodinamicheskie harakteristiki vblizi ekrana / R.A. Musatov // Sbornik dokladov konferencii Gelendzhik-2002. – M.: Tipografiya CAGI, 2002. – S. 273-280.
9. Alexander Nebylov, Vladimir Nebylov, Pierre FABRE, WIG –Craft Flight Control Above The Waved Sea, State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia.
10. A.N. Panchenkov, Ekspertiza ekranoplanov / A.N. Panchenkov, P.T. Drachev, V.I. Lyubimov. – N.Novgorod: VGAVT, 2006. – 520s.
11. P.J. Mantle, Induced drag of wings in ground effect, Vashon, Washington USA, 2016
12. 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.
13. M. Tavakoli Dakhrabadi, M.S. Seif, A practical method for aerodynamic investigation of WIG, Int. J. Aircr. Eng. Aerosp. Technol, 2016.
14. Shirmanov P. M. Atlas aerodinamicheskikh harakteristik aviacionnykh profilej. Moskva : Gos. aviacionnoe i avtotraktorn. izd-vo, 1932.
15. Abdullin A.A. Aerodinamicheskie harakteristiki i prodol'naya ustojchivost' skhematizirovannoj modeli ekranoplana samoletnoj skhemy na krejzerskom rezhime poleta// Sbornik dokladov konferencii Gelendzhik-2016. – M.: Tipografiya CAGI, 2016. – S. 94-98.
16. E.P. Vizel', A.A. Grigor'ev, YU.A. Zaharchenko, Aerodinamika ekranoplanov samolyotnoj skhemy s kombi-nirovannymi nesushchimi poverhnostyami// Tekhnika vozdušnogo flota. M.: Tipografiya CAGI, 2014

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Андрей Николаевич Лучков**

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 ш., 4  
E-mail: a.luchOK.n@gmail.com

**Евгений Васильевич Журавлев**

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 ш., 4  
E-mail: e.zhuravlev\_mai@mai.ru

**Егор Юрьевич Чебан**

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, Volokolamskoye av., A-80, GSP-3, Moscow, 125993, Russia  
e-mail: 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., A-80, GSP-3, Moscow, 125993, Russia  
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, Russia  
e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18.02.2020 г.

УДК 629.124.9.039

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.40>

## ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКОРОСТНЫХ СУДОВ В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**В.И. Любимов**

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

**Ю.Г. Варакосов**

*Ассоциация «Экраноплан», г. Москва, Россия*

**В.И. Барышев**

*Судоходная компания «Элиен», Нижегородская область, Россия*

*Аннотация. Рассматриваются актуальные вопросы обоснования и использования различных видов пассажирского транспорта. На примере Северо-Западного региона России проанализированы особенности использования и эксплуатационные затраты автомобильного, железнодорожного, воздушного, морского и речного транспорта. Особое внимание уделяется применению морских и речных скоростных пассажирских судов. Приведены технико-эксплуатационные характеристики новых типов скоростных пассажирских судов. Выполнен технико-экономический анализ использования различных типов скоростных пассажирских судов. Показано, что по ряду технико-экономических показателей эффективности пассажирских перевозок экранопланы превосходят характеристики других типов скоростных судов.*

*Ключевые слова: транспортная система, виды транспорта, пассажирские перевозки, эксплуатационные затраты, скоростные суда, экранопланы, особенности конструкции, сферы эксплуатации.*

### Введение

Как известно, любое транспортное средство для выполнения функционального назначения в соответствии с условиями работы должно обладать определенными эксплуатационными качествами. Огромная территория РФ предопределяет для обеспечения перевозок населения использование скоростных транспортных систем. В качестве таковых могут рассматриваться железнодорожный, автомобильный, авиационный, морской и речной транспорт. С учетом имеющихся преимуществ каждый из них должен занимать определенную транспортную нишу. Например, в Европейской части РФ неоспоримыми преимуществами в пассажирских перевозках обладают железнодорожный и автомобильный транспорт. Для дальних перевозок пассажиров целесообразно использовать воздушный транспорт.

Важное место в пассажирских перевозках, особенно для туристов, занимают морские и речные суда. Во многих регионах Сибири и Дальнего Востока, из-за отсутствия железнодорожных и автомобильных путей, единственными транспортными средствами для населения являются скоростные пассажирские суда. Перспективные скоростные транспортные системы могут быть созданы в Приморье и для освоения арктических районов Якутии [1, 6].

### Особенности использования различных видов пассажирского транспорта

Выполним анализ структуры эксплуатационных затрат для конкурирующих видов транспорта на примере Северо-Западного региона России [2].

В настоящее время в этом регионе наилучшим образом доставка пассажиров осуществляется автомобильным транспортом (более 50% местного пассажирооборота). Это положение имеет основание. Автомобили характеризуются высокой топливной экономичностью (в среднем 3–7 г/пасс·км), значительной провозоспособностью, относительно малыми амортизационными отчислениями. Вместе с тем автомобильный транспорт отличает высокая дорожная составляющая транспортных расходов (до 45%). Это подтверждает и вступившая в эксплуатацию в 2019 году скоростная автодорога Москва – Санкт-Петербург. У железнодорожников такая же структура затрат [2].

Уменьшить тарифы на пассажирские перевозки автомобильным и железнодорожным транспортом можно за счет снижения затрат на капитальные сооружения. Это реализуется на практике: строятся новые железнодорожные пути, автомобильные магистрали с современным дорожным покрытием, новыми мостами и развязками, повышается интенсивность движения. Поэтому в Северо-Западном регионе упомянутые виды транспорта определенно убыточны, и для их функционирования необходимы значительные инвестиции.

При анализе эксплуатационных затрат на воздушный транспорт следует различать магистральную авиацию и перевозки пассажиров на местных линиях.

На магистральных самолетах затраты на топливо составляют более четверти эксплуатационных расходов, составляя расход горючего примерно 18–25 г/пасс·км. Для воздушного транспорта характерны также высокие затраты на содержание наземных сооружений и на содержание вспомогательных служб. Выполненные исследования показывают, что аэронавигационное обслуживание достигает до 10% стоимости авиаперевозок, а наземное обслуживание до 15–20% общей стоимости авиаперевозок [2].

Самолеты местных линий в отличие от магистральных имеют более высокие затраты топлива (35–60 г/пасс·км) и меньшие скорости (200–500 км/ч). Они имеют меньшую комфортабельность и более подвержены влиянию метеорологических условий. Большинство региональных аэропортов Сибири и Дальнего Востока не имеют твердого покрытия. Следовательно, сократить стоимость пассажирских перевозок на местных линиях можно за счет увеличения частоты рейсов и повышения нагрузки на инфраструктуру [2].

Структура эксплуатационных затрат на водном транспорте кардинально иная. На судах основная доля расходов (до 50%) приходится на топливо, что обусловлено высокой энерговооруженностью скоростного пассажирского флота, при ограниченных скоростях движения (40–65 км/ч). Продолжительные межнавигационные простои не позволяют пассажирским скоростным судам занимать стабильную нишу на рынке транспортных услуг.

#### **Анализ технико-экономических показателей применения пассажирских скоростных судов различных типов**

В настоящее время скоростные перевозки пассажиров на водном транспорте осуществляются на судах на подводных крыльях (СПК), амфибийных и скеговых судах на воздушной подушке (соответственно АСВП и ССВП) и экранопланах (ЭП). В зависимости от условий эксплуатации каждый из упомянутых типов скоростных судов занимает свою нишу в перевозках пассажиров.

Реальные действия по возрождению скоростного флота принимает АО «ЦКБ по СПК имени Р.Е. Алексеева». В конце 2017 г. после 25-летнего перерыва на научно-производственном комплексе ЦКБ по СПК состоялся спуск на воду СПК «Валдай 45Р» (рисунок 1).

Построена головная серия судов этого проекта. Два СПК «Валдай 45Р» работают в Ханты-Мансийском автономном округе. Начата постройка пассажирских СПК типа «Метеор».



Рис. 1. «Валдай 45Р»

Еще одним шагом в возрождении скоростного флота можно считать успешную эксплуатацию на линии Севастополь–Ялта морского СПК «Комета–120М». Средняя загрузка СПК, начавшего работу в 2018 г., составляет 99%. Судоходная компания, эксплуатирующая новое судно, заявила о желании ввести в строй еще пять СПК этого проекта [8].

Высокая скорость хода и амфибийность позволяют обеспечить круглогодичные перевозки пассажиров на АСВП и ЭП. Именно эти эксплуатационные качества позволили использовать АСВП на перевозках пассажиров в ряде регионов Якутии и Дальнего Востока, а также для выполнения целей МЧС и органов контроля судоходства во многих районах РФ.

Ведущую роль в постройке серийных АСВП в России занимает нижегородская компания «Аэроход». По проектам этой компании, начиная с 2000 г., построено более 900 единиц АСВП различного назначения. Несколько лет ведется постройка многоцелевых АСВП «Хивус-6» и «Хивус-10», предназначенных для круглогодичной эксплуатации (рис. 2, табл. 1). Самыми крупными судами компании «Аэроход» является АСВП проекта А48 на 48 пассажиров. В начале 2018 г. компания завершила постройку двух АСВП проекта А20П для Ханты-Мансийского автономного округа (см. табл. 1). Эти суда успешно работают на пассажирских линиях округа.



Рис. 2. «Хивус-6»

Большие перспективы компания «Аэроход» связывает с постройкой АСВП с аэродинамической разгрузкой (АР). Самоходная модель такого судна «Тунгус» (проект А18) прошла всесторонние испытания. Ее характеристики: габаритная длина 10 м, габаритная ширина 8 м, габаритная высота 2,5 м, взлетная масса 1800 кг. Отличительной особенностью новых судов является наличие компоновочных элементов, присущих как амфибийным судам, так и ЭП. Принятая конструкция позволяет судну в случае необходимости развивать скорость, свойственную ЭП (до 200 км/ч) или же ско-

рость, свойственную АСВП (до 80 км/ч), в соответствии с условиями эксплуатации (рис. 3). В 2018 году парк АСВП пополнили пять судов, построенных ООО «СК «Нептун» и ООО «Ховеркрафт». Они сдали четыре АСВП «Нептун-23» и одно судно на 120 пассажиров.

*Таблица 1*

**Технико-эксплуатационные характеристики амфибийных СВП**

Характеристики	Названия судов			
	Хивус-6	Хивус-10	Пр. А32	Пр. А20П
Пассажировместимость, чел	6	10	48-50	26
Габариты, м:				
– длина	6,45	7,45	19,0	14,4
– ширина	3,30	3,30	8,0	5,0
Количество и мощность двигателей, кВт	1×81	1×105	2×316	1×503
Скорость, км/ч	50	50	60	50
Дальность, км	500	400	1500	400

Большие перспективы компания «Аэроход» связывает с постройкой АСВП с аэродинамической разгрузкой (АР). Самоходная модель такого судна «Тунгус» (проект А18) прошла всесторонние испытания. Ее характеристики: габаритная длина 10 м, габаритная ширина 8 м, габаритная высота 2,5 м, взлетная масса 1800 кг. Отличительной особенностью новых судов является наличие компоновочных элементов, присущих как амфибийным судам, так и ЭП. Принятая конструкция позволяет судну в случае необходимости развивать скорость, свойственную ЭП (до 200 км/ч) или же скорость, свойственную АСВП (до 80 км/ч), в соответствии с условиями эксплуатации (рис. 3). В 2018 году парк АСВП пополнили пять судов, построенных ООО «СК «Нептун» и ООО «Ховеркрафт». Они сдали четыре АСВП «Нептун-23» и одно судно на 120 пассажиров.



Рис. 3 АСВП с АР

Еще одним потенциальным направлением создания скоростных пассажирских судов являются экранопланы. В последние годы в России и за рубежом появляются новые экспериментальные ЭП [8], [9], [10]. Их взлетная масса доходит до 10 т. Примером в этом отношении могут быть ЭП семейства «Иволга-2» ЗАО НПК «ТРЕК» (г. Жуковский). Эти скоростные ЭП рассматриваются как перспективные для транспортных систем Приморья и арктических районов Якутии.

Реальные результаты по созданию пассажирских ЭП достигнуты объединением «Орион». В Иране сданы в эксплуатацию два ЭП «Орион–12», которые могут взять на борт 10 пассажиров или 1,2 т груза (рис. 4, табл. 2). В 2014 г. проведены испытания 20-местного ЭП «Орион–20». Его взлетная масса 10 т (рис. 5).



Рис. 4. Полет экраноплана типа «Орион–12» над водой

В июле 2015 г. во время испытаний «Орион–20» потерпел аварию и получил повреждения. Вскоре судно было восстановлено и модернизировано.

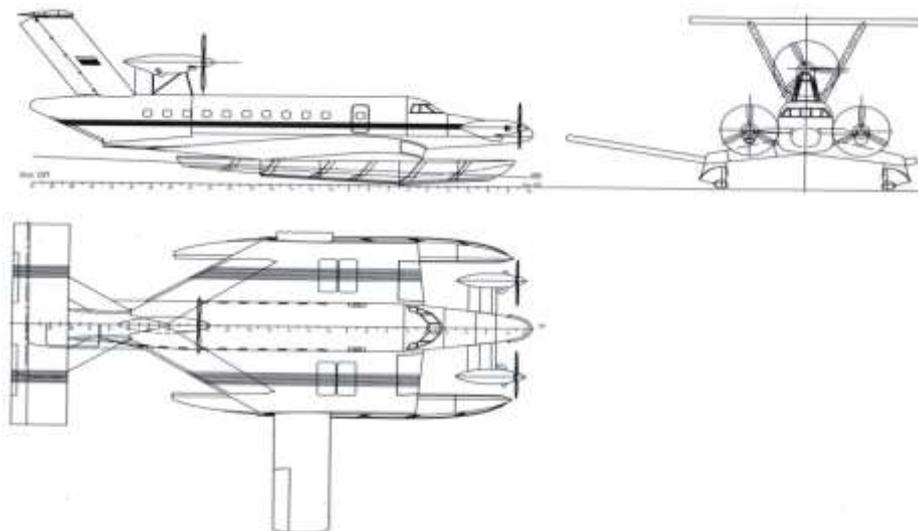


Рис. 5. Схема общего расположения «Орион–20»

По сравнению с предшественником ЭП «Орион 20М» имеет взлетную массу на одну тонну больше. На ЭП установлен третий двигатель марки М601. Проводятся испытания модернизированного пассажирского ЭП.

Работы по созданию ЭП ведутся и другими проектными организациями. Например, в ПКБ судоходной компании «Элиен» выполнены проектные проработки перспективных пассажирских ЭП, имеющих аэродинамическую схему «составное крыло». Из разработанного масштабного ряда высокоскоростных судов выделяется морской ЭП МПЭ–40 (табл. 2). ЭП спроектирован как пассажирское судно с возможностью переоборудования в грузопассажирское и патрульное судно. Предусмотрена эксплуатация ЭП МПЭ–40 на прибрежных морских линиях (рис.6).

**Технико-эксплуатационные характеристики  
пассажирских экранопланов**

Характеристики	Название судов		
	Орион-12	Орион-20	МПЭ-40
Пассажировместимость, чел.	12	20	30–40
Габариты, м:			
– длина	15	22,2	26,3
– ширина	14,5	20,6	16,2
– высота борта	4,5	8,3	6,0
Взлетная масса, т	5,1	12,5	15,3
Тип, количество и мощность двигателей, л.с.	LS3 2×420	M601E 2×750	ВК-2500 1×2400
Скорость, км/ч	185–220	200	230–240
Мореходность, h <sub>в</sub> , т	1,2	1,25	1,25
Высота крейсерного полета, м	<10,0	<10,0	3,5
Дальность, км	1000	1000	1000

В качестве перспективных трасс для работы нового ЭП могут рассматриваться внутренние и междугородние линии Балтийского и Белого морей. Например, Санкт-Петербург–Хельсинки–Стокгольм (708 км), Санкт-Петербург – Выборг (160 км) и другие.



Рис. 6. Морской пассажирский ЭП МПЭ-40

Выполнена сравнительная оценка эффективности работы нового ЭП с технико-экономическими показателями СПК «Метеор», СВП «Хивус-48» и «Ирбис», ЭП «Волга» и «Орион-12» на линии протяженностью 300 км (табл. 3). Анализ полученных результатов показывает, что новое судно имеет существенные преимущества с аналогами по скорости, провозной способности и топливной эффективности.

Таблица 3

**Технико-экономические показатели скоростных  
пассажирских судов различных типов**

Характеристики	Типы и названия судов					
	СПК «Метеор»	СВП «Хивус- 48»	СВП «Ир- бис»	ЭП «Волга- 2»	ЭП «Орион- 12»	ЭП МПЭ-40
Пассажировместимость, чел.	124	48	32	8	10	40
Масса полная, тс	53	18,0	10,7	3,05	4,8	15,0
Масса порожнем, тс	37	12,6	7,4	·	2,6	9,0
Габариты, м: – длина	34,6	18,5	17,0	11,6	14,6	26
– ширина	9,5	8,0	6,2	7,63	14,7	16
– высота	–	7,42	–	6	4,42	6,2
Мореходность, $h_{в}$ , м	1,2	1,2	1,2	0,5	1,25	1,25
Дальность, км	·	1500	·	350	·	1100
Тип двигателя	2×M50Ф-3	2×Mercedes OM501LA	2×Deutz BF6L913/C	2×3M3	2×LS-3	1×BK-2500
Мощность макс./крейс., л.с	2400/1800	910/840	382/346	2×150	2×426	2400/1200
Удельный расход топлива, г/(л.с.·ч)	210	136	170	·	·	230
Часовой расход топлива, кг/ч	378	114	59	·	·	274
Линия работы, км	300	300	300	300	300	300
Скорость на линии, км/ч	67	60	45	120	185	240
Время в пути, ч	4,5	5,0	6,7	2,5	1,65	1,25
Ходовое время за навигацию, ч	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Общий пробег за навигацию, тыс.км	134,0	120,0	90,0	·	·	454,0
Расходы топлива за навигацию, т	756	228	118	·	·	548
Провозная способность за год, млн пасс. км	16,6	5,8	2,9	·	·	18,2
Топливная эффективность, г/пасс. км	45,5	39,3	40,7	61	·	30,1
Удельная пассажироместимость, чел/т	2,34	2,67	2,9	2,62	2,1	2,66

**Заключение**

Проведенный анализ показывает, что каждый вид пассажирского транспорта имеет свою транспортную нишу, в которой находится вне конкуренции.

Приведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что транспортная система России может быть пополнена новыми скоростными судами различных типов. Эти суда необходимы для освоения районов Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока.

Проектируемые пассажирские ЭП имеют существенные преимущества по сравнению с эксплуатируемыми аналогами по скорости, провозной способности и топливной эффективности. Они могут рассматриваться как перспективный тип скоростных пассажирских судов.

**Список литературы:**

1. Смердов В.Н., Любимов В.И. Пассажирские скоростные суда – важные компоненты транспортного комплекса Ленского бассейна // Речной Транспорт (XXI век). 2014. – № 2. – С. 65–68.
2. Любимов В.И., Гаккель А.А., Барышев В.И. «Мы не плаваем, мы летаем!» – девиз компании «Элиан». – Н.Новгород: ООО «Поволжье», 2007. – 68 с.
3. Любимов В.И., Гаккель А.А., Барышев В.И. Методологические основы комплексного обоснования характеристик пассажирских экранопланов // Вестник ВГАВТ. Вып.22. – Н. Новгород. Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2007. С.51–55.
4. Любимов В.И., Вараков Ю.Г., Барышев В.И. Современные концепции и перспективные сферы использования транспортных экранопланов // Вестник ВГАВТ. Вып. 31. Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – С. 64–67.
5. Любимов В.И., Барышев В.И. Перспективные области применения транспортных экранопланов // Речной Транспорт (XXI век). 2015. – № 2. – С. 57–59.
6. Федорев Г.А., Знатков А.С., Шауб П.А. Экранопланы и скоростные транспортные системы для Приморья и освоения арктических регионов Якутии // Судостроение, 2017. – №2. – С. 12–16.
7. Любимов В.И., Роннов Е.П. Особенности проектирования судов в динамических принципах поддержания: учеб. пособие. – Н.Новгород. Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2018. – 143 с.
8. Любимов В.И., Роннов Е.П., Малышкин А.А., Барышев В.И. Современное состояние, тенденции развития и коммерческого использования скоростных судов // Судостроение, 2019. – №5. – С. 13–18.
9. Zalek S., Karr D.G., Jabbarzadeh S., Maki K.J. Modeling of air cushion vehicle's flexible seals under steady state conditions // Ocean Systems Engineering. 2011, vol.1., no.1, pp.17-28
10. Xuan Zhang, Qiulin Qu, Ramesh K., Aqerval Computations of Flow Fields of an Airfoil and a Wing with Gurney Flap in Ground Effect //35th AIAA Aerodynamics conference, 2017. doi: 10.2514/6.2017-4466. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2017-4466>

**TECHNICAL AND OPERATIONAL ASPECTS  
OF THE HIGH-SPEED VESSELS USE  
IN THE RUSSIAN FEDERATION TRANSPORT SYSTEM**

**Viktor I. Lyubimov,**

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

**Yuri G. Varakosov,**

*«Ekranoplan» Association, Moscow, Russia*

**Viktor I. Baryshev,**

*Shipping company «Elan», Nizhny Novgorod Region, Russia*

*Abstract. Topical issues of justification and use of various types of passenger transport are considered. Use peculiarities and operating costs of automobile, railway, air, sea and river transport are analyzed on the example of the North-Western region of Russia. Special attention is paid to the use of sea and river high-speed passenger ships. Technical and operational characteristics of new types of high-speed passenger ships are described. A feasibility study of using various types of high-speed passenger ships has been performed. It is shown that according to a number of technical and economic indicators of the passenger transportation efficiency, WIG vessels exceed the characteristics of other types of high-speed vessels.*

*Key words: transport system, transport types, passenger transportation, operating costs, high-speed vessels, WIG vessels, design features, operation spheres*

#### References:

1. Smerdov V.N., Lyubimov V.I. Passenger high-speed vessels - important components of the transport complex of the Lena basin // River transport (XXI century). 2014. – No. 2. – P.65–68
2. Lyubimov V.I., Gakkel A.A., Baryshev V.I. «We don't swim, we fly!» – the motto of the «Elian» company // V. I. Lyubimov, A. A. Gakkel, V. I. Baryshev. St. Petersburg, 2007. – 68 p.
3. Lyubimov V.I., Gakkel A.A., Baryshev V.I. Methodological foundations of a comprehensive justification of the passenger ekranoplans characteristics // Vestnik of the Volga State Academy of Water Transport. 2007. No. 22. P. 51–55.
4. Lyubimov V.I., Varakosov Yu.G., Baryshev V.I. Modern concepts and promising areas of ekranoplans use // Vestnik of the Volga State Academy of Water Transport. 2012. No. 31. P. 64–67.
5. Lyubimov V.I., Baryshev V.I. Promising areas for the use of vehicle ekranoplanes // River transport (XXI century). – 2015. – No. 2. – P. 57–59.
6. Fedoreev G.A., Znatkov A.S., Shaub P.A. Ekranoplans and high-speed transport vessels for Primorye and the development of the Arctic regions of Yakutia // Shipbuilding. 2017 – No. 2. P.12–16.
7. Lyubimov V.I., Ronnov E.P. Design features of vessels with dynamic principles of maintenance: a training manual. – N. Novgorod: Publishing house of "Volga State University of Water Transport". – 2018. – 143 p.
8. Lyubimov V.I., Ronnov E.P., Malyshekin A.G., Baryshev V.I. Current status, development trends and commercial use of high-speed vessels // Shipbuilding. 2019. – No. 5. – P. 13–18.
9. Zalek S., Karr D.G., Jabbarizadeh S., Maki K.J. Modeling of air cushion vehicle's flexible seals under steady state conditions // Ocean Systems Engineering. 2011, vol.1., no.1, pp.17–28
10. Xuan Zhang, Qiulin Qu, Ramesh K., Aqerval Computations of Flow Fields of an Airfoil and a Wing with Gurney Flap in Ground Effect //35th AIAA Aerodynamics conference, 2017. doi:10.2514/6.2017-4466. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2017-4466>

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

**Виктор Иванович Любимов**, д.т.н., профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ») 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [ptps@vgavt\\_nn.ru](mailto:ptps@vgavt_nn.ru)

**Юрий Геннадьевич Варакосов**, кандидат военных наук, директор ассоциации «Экраноплан», 111675, г. Москва, ул. Святоозерная, 32-51, e-mail: [Ekranoplan210@yandex.ru](mailto:Ekranoplan210@yandex.ru)

**Виктор Иванович Барышев**, начальник ПКБ судоходной компании «Элиан», 606549 Нижегородская обл., Чкаловский район, Кузнецово, ул. Алексеева, 3, e-mail: [viktor\\_3v@mail.ru](mailto:viktor_3v@mail.ru)

**Viktor I. Lyubimov**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Yuri G. Varakosov**, Candidate of Military Sciences, Director of the «Ekranoplan» Association, 32–51, Svyatoozernaya st, Moscow, 111675

**Viktor I. Baryshev**, of the design bureau head of the shipping company «Elian», 3, Alekseev st, Kuznetsovo, Chkalovsky District, Nizhny Novgorod Region, 606549

Статья поступила в редакцию 28.01.2020 г.

УДК 629.122

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.50>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧНЫХ ЗЕМЛЕСОСНЫХ СНАРЯДОВ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Э.Г. Румянцев**

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

**Е.П. Роннов**

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

*Аннотация. В статье впервые приводится методика расчета на стадиях исследовательского проектирования основных элементов и характеристик речных земснарядов статистическим методом. Для исследования были использованы наиболее распространенные проекты речных несамходных земснарядов различных архитектурно-конструктивных типов как с жилой надстройкой, так и без нее, в широком диапазоне производительности по грунту. Были подробно проанализированы зависимости полного водоизмещения и мощности главного двигателя от основных данных технического задания, таких как производительность землесоса и глубина разработки грунта. Получены графические зависимости и аналитические выражения для определения главных размерений землесоса. Отдельно рассмотрен вопрос выбора длины основных отсеков земснаряда, что позволяет решать задачу предварительной разбивки корпуса на отсеки. Дается анализ точности полученных статистических зависимостей определения длин судна.*

*Ключевые слова: землесос, земснаряд, главные размерения, длина отсеков корпуса, добыча нерудных материалов, производительность землесоса, глубина рыления.*

### Введение

В настоящее время как проектирование, так и строительство добычных судов технического флота водоизмещением более 300 т находится практически на нуле. Основу эксплуатируемого флота этого типа составляют суда старых проектов постройки до 90-х годов XX века [1]. Каждое из этих судов имеет ограниченный срок эксплуатации и в недалеком будущем, даже проверенные временем, они придут в негодность, и потребуются их замена новыми. Однако, до сих пор не существует единой методики определения основных элементов и характеристик речных земснарядов, что создает серьезные проблемы на этапе обоснования их оптимальных параметров, целесообразности проектирования и постройки. Данная работа выполнена в целях создания такой методики проектирования добычных судов технического флота. Поскольку задачи начальных стадий ставятся в условиях отсутствия необходимой информации по судну, кроме данных технического задания, то их решение достигается с использованием статистического анализа по ранее спроектированным судам рассматриваемого типа и назначения. Данный методический подход принят и в настоящей работе.

### Характеристика статистической базы

Элементы и характеристики земснарядов [2], по которым выполняется статистический анализ, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Элементы и характеристики земснарядов

Элементы и характеристики	Номера проектов земснарядов												
	324*	1-516*	P109*	12*	1-520*	4395	23-110	81390	P139	RDB 66.42	ДЭ-725	RDB 66.09	23-112
Длина расчетная, м	25,8	49	52,6	40	49,4	54	45,8	52,6	85	52,9	50	69,9	58
Ширина, м	7,5	10,6	10	9,2	9,2	10,5	9	10	12	12	9,2	12	9,2
Высота борта, м	1,5	2,6	2,8	2,85	2,7	3,65	2,5	2,8	4	3,4	2,8	3,5	2,8
Осадка в рабочем положении, м	0,64	1,08	1,26	1,20	1,64	1,30	1,28	1,87	1,47	1,33	1,36	1,85	1,43
Водоизмещение попрожнем, т	93,5	408	446	322	575	-	398	446	946	-	467	980	527
Глубина разработки, м	8	11,5	15	11	18	10	11	20	25	10	11	30	8
Мощность привода, кВт	165	515	367	257	340	400	397	426	883	1200	588	736	589
Водоизмещение в рабочем положении, т	108,5	434	555	386	630	653	469	555	1231	747	544	1206	680
Производительность проектная, м <sup>3</sup> /ч	250	500	525	600	600	700	700	800	800	1000	1000	1500	725
Класс Российского Речного Регистра	Л	Р	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О

Одной из архитектурно-конструктивных особенностей земснарядов является размещение экипажа [3]. На земснарядах, отмеченных в таблице 1 знаком (\*), экипаж на судне не проживает. Для этих целей используются специальные стояночные судабрандвахты. Тогда как на более крупных судах для размещения экипажа используются достаточно развитые надстройки [4].

Удаление поднятого грунта на дноуглубительных земснарядах производится по плавучему грунтопроводу. Чисто добычные земснаряды таких грунтопроводов могут не иметь, либо на них дополнительно предусматривается выгрузка грунта непосредственно в бункер [5]. На земснарядах используются различные способы рыхления грунта. На мягких грунтах используются гидравлическое рыхление. При разработке тяжелых грунтов, например, гравийного типа, используются различного типа фрезерные разрыхлители [6].

Отмеченные архитектурно-конструктивные особенности следует учитывать при статистическом анализе элементов и характеристик земснарядов.

Анализ главных элементов

Основными характеристиками, которые указываются в задании на проектирование земснаряда, являются его производительность  $Q$  и глубина  $H_p$  разработки (рыхления) грунта. Поэтому для предварительной оценки главных размерений их и следует использовать в качестве аргументов.

Длина судна во многом определяется условием размещения в корпусе и на палубе оборудования, механизмов и устройств, обеспечивающих необходимую, в соответствии с заданием, производительность земснаряда [7]. На графике рис. 1 приведена эта зависимость, аналитический вид которой следующий:

$$L = 2,064 * Q^{0,4868} \quad (1)$$

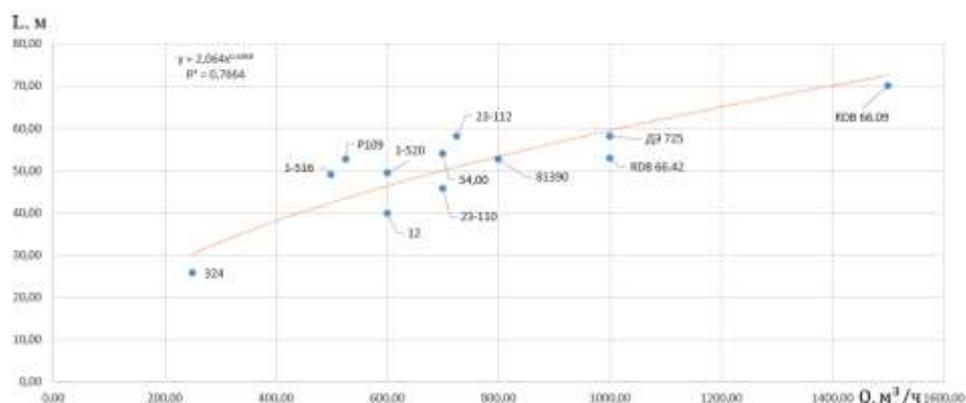


Рис. 1. Зависимость расчетной длины земснаряда от его производительности

Условия размещения главных механизмов, судовых устройств, обеспечивающих функционирование землесоса, а также основные навигационные качества судна, определяет его ширина. Зависимость ширины земснаряда от производительности приведена на рис. 2.

Аналитически эта зависимость имеет вид:

$$B = 2,2305 * Q^{0,2287} \quad (2)$$

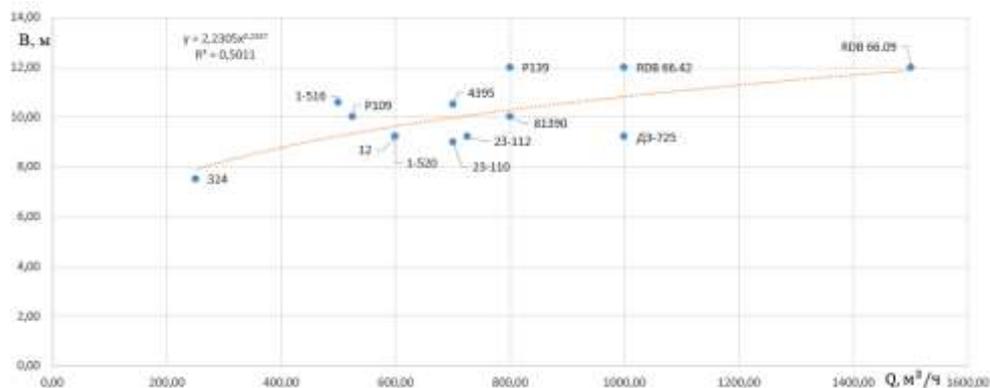


Рис. 2. Зависимость ширины землесоса от производительности

Высота борта определяется условиями размещения в корпусе жилых и служебных помещений, главных и вспомогательных механизмов, требованиями о минимальной высоте надводного борта и обеспечения устойчивости и прочности. На графике рис. 3 приведена зависимость высоты борта от производительности земснаряда. Она также может быть рассчитана по формуле:

$$H = 1,167 * Q^{0,1485} \quad (3)$$

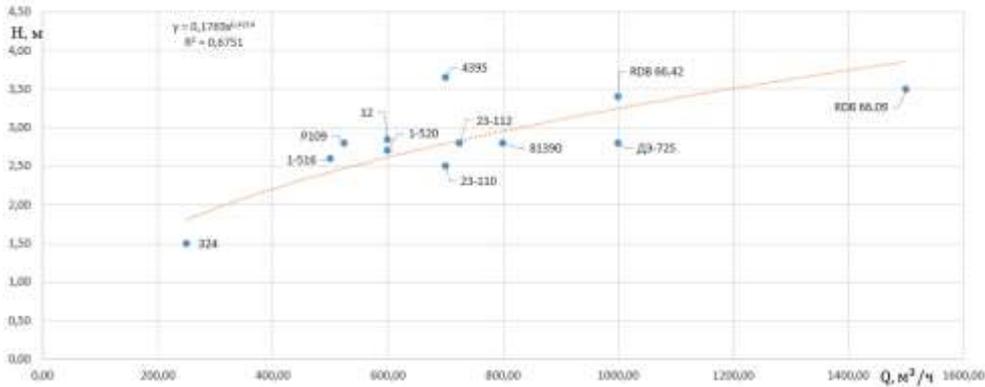


Рис. 3. Зависимость высоты борта от производительности землесоса

Землесосы имеют упрощенную форму корпуса и, по сути, являются стоячными судами. Поэтому их коэффициент полноты водоизмещения близок к единице, что положительно влияет на уменьшение осадки. Но и с точки зрения выполнения основных технологических операций землесосу большая осадка не нужна. Как показано на рис. 4, даже у наиболее мощных речных снарядов она не превышает 1,8 м. Формула, отражающая эту зависимость:

$$T = 4,26 * 10^{-2} * Q^{0,5255} \quad (4)$$

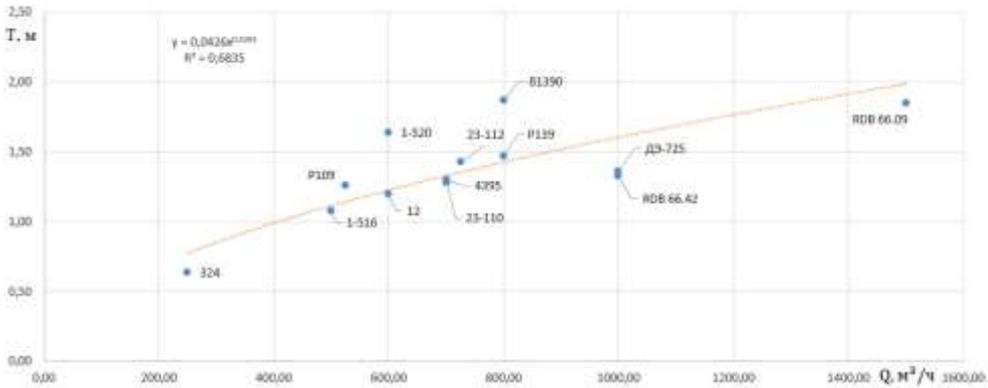


Рис.4. Зависимость осадки землесоса от производительности

На рис. 5 приведена зависимость полного водоизмещения  $D$  от проектной производительности  $Q$ . Она имеет линейный характер и описывается следующим выражением:

$$D = 0,83 * Q - 17,4 \quad (5)$$

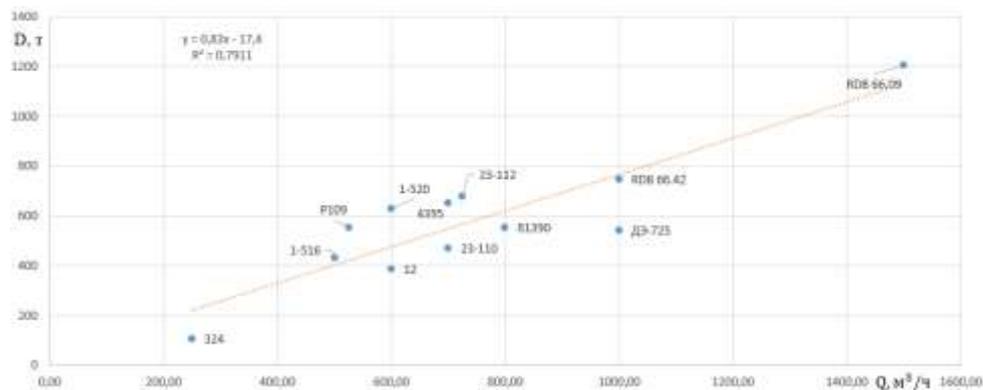


Рис. 5. Результаты зависимости водоизмещения от производительности

На рис. 6 дана зависимость мощности энергетической установки  $N$  (мощность привода грунтового насоса) от проектной производительности землесоса  $Q$ . Аналитически данная линейная зависимость имеет вид:

$$N = 0,5 * Q + 80 \quad (6)$$



Рис. 6. Зависимость мощности привода от производительности

#### Анализ величины отсеков корпуса

После определения в первом приближении главных элементов судна важно определиться с размером основных отсеков корпуса. На самоходном землесосе отсеки по их функциональному назначению и размерам весьма специфические. Кроме отсека машинного отделения, в котором располагаются главные и вспомогательные двигатели, вспомогательные установки и механизмы, на землесосе иногда выделяется в отдельный отсек грунтового насосного оборудования [8]. Отсек носовой прорези в корпусе предназначен для размещения забортного пульпопровода с разрыхлителем и приемником пульпы, а также переходного участка к магистрали грунтового насоса. Палуба кормового ахтерпикового отсека используется для размещения оборудования подсоединения к плавучему пульпопроводу и закорных свай.

Длину машинного отделения на начальных стадиях проектирования связывают с мощностью главных двигателей и их типом. На рис.7 такая линейная зависимость приведена, аналитический вид которой следующий:

$$L_{MO} = 3,4 * 10^{-3} * N + 7,18 \quad (7)$$

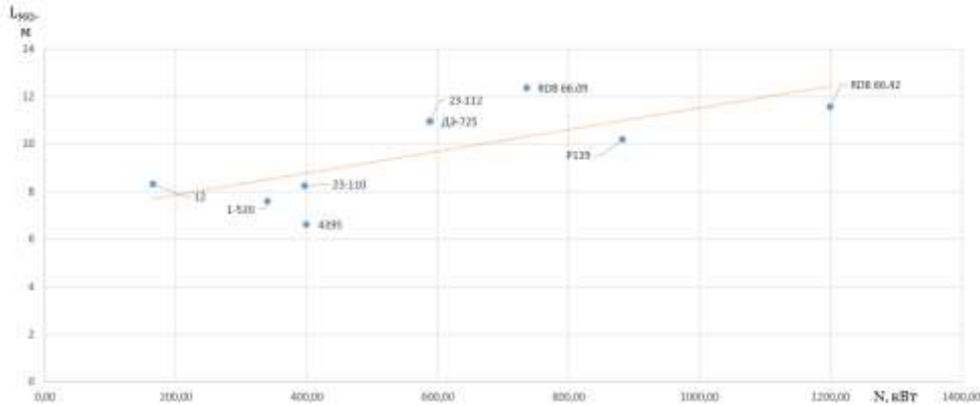


Рис. 7. Зависимость длины машинного отделения от мощности привода

Длина отсека носовой прорези для пульпопровода зависит от глубины рыхления  $H_p$  землесоса, что показано на графике рис. 8. Зависимость имеет линейный характер и описывается выражением:

$$L_p = 1,6 * H_p - 2 \quad (8)$$

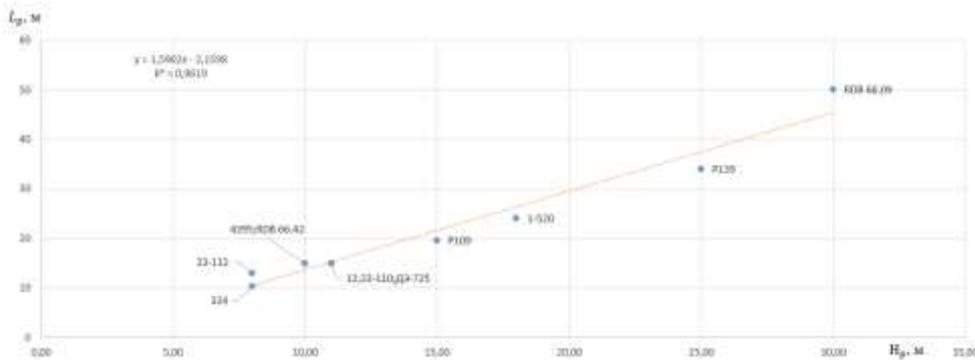


Рис. 8. Зависимость длины носовой прорези от глубины рыхления земснаряда

Кормовой отсек включает в себя расстояние от кормовой переборки машинного отделения до кормового перпендикуляра. На несамходном землесосе в этом отсеке рулевая машина отсутствует. Как отмечалось выше, отсек обеспечивает площадь главной палубы в корме, необходимую для размещения устройств, обеспечивающих соединение судовой части пульпопровода с его плавучей частью. Иногда для улучшения условий размещения и обслуживания узла перехода судового пульпопровода в плавучий, площадь палубы в корме увеличивают навесной палубой (кринолины) с прорезью. Наличие кринолина с прорезью изменяет габаритную и наибольшую длину землесоса, а на расчетной длине практически не сказывается. На рис.9 приведена зависимость длины кормового отсека  $L_k$  от произведения ширины на высоту борта корпуса землесоса.

Аналитический вид этой зависимости следующий:

$$L_k = 0,4 * B * H - 1 \quad (9)$$

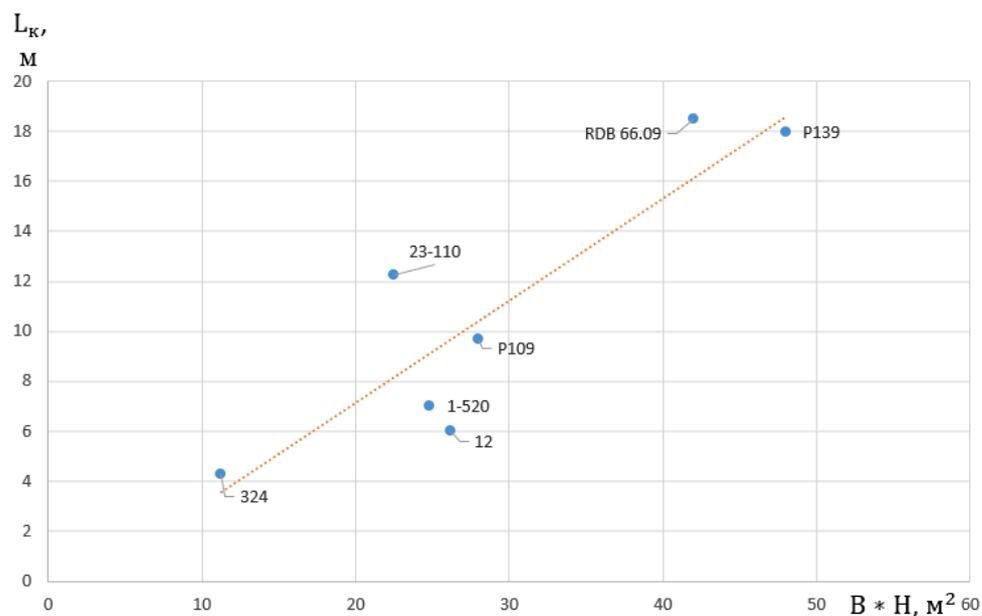


Рис. 9. Зависимость длины кормового отсека  $L_k$  от произведения ширины корпуса  $B$  на высоту борта  $H$

При наличии свайного хода значение, получаемое по формуле (9) следует умножить на коэффициент, равный 2.

Размеры насосного отделения зависят от габаритных размеров грунтового насоса и совокупного с ним оборудования [9]. Характеристики насоса в свою очередь зависят как от его производительности, так и от развиваемого им напора, зависящего от глубины рыхления  $H_p$ . Поэтому при анализе длины насосного отделения (рис. 10) в качестве аргумента было принято произведение  $Q * H_p$ . Зависимость  $L_{НО} = f(Q * H_p)$  имеет линейный характер и описывается следующим выражением:

$$L_{НО} = 1,25 * 10^{-4} * Q * H_p + 2,75 \quad (10)$$

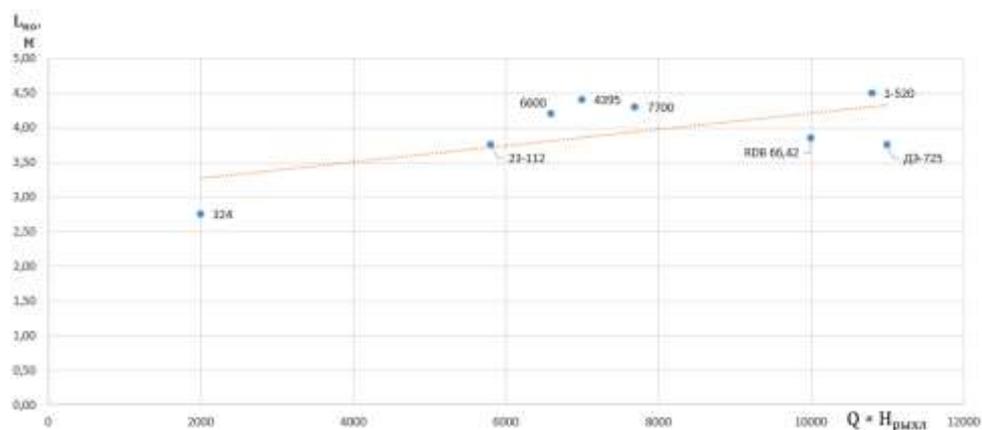


Рис. 10. Зависимость длины насосного отделения от произведения производительности на глубину рыхления  $Q * H_p$ .

Сложив размеры отдельных отсеков корпуса, можно получить расчетную длину корпуса судна:

$$L = L_{\text{мо}} + L_{\text{р}} + L_{\text{к}} + L_{\text{но}} \quad (11)$$

Выражение (11) может быть использовано для дополнительного анализа при формировании длины землесоса.

В таблице в качестве примера приведено сравнение результатов расчета расчетной длины (по конструктивной ватерлинии), полученной по статистическим зависимостям (1) и (11) с фактическими значениями.

Таблица 2

**Анализ результатов расчета по отдельным методикам длины землесосов**

№ проекта	Длина по проекту, м	Длина по формуле (1), м	Длина по формуле (11)
324	25,8	30,34/+17,59%	25,04/-2,94%
1-516	49	42,51/-13,22%	38,82/-20,76%
P109	52,6	43,53/-17,22%	44,36/-15,66%
12	40	46,46/+16,15%	36,71/-8,2%
1-520	49,44	46,46/-6,02%	48,17/-2,56%
4395	54	50,08/-7,25%	54,82/+1,52%
23-110	58,85	50,08/+9,23%	43,84/-4,37%
81390	53,25	53,44/-1,61%	53,57/+1,86%
P139	85	53,44/-37,11%	71,63/-15,72%
RDB 66.42	52,9	59,58/+12,62%	59,9/+13,23%
ДЭ-725	50	59,58/+2,72%	47,51/-18,08%
RBD 66.09	69,9	72,58/+3,83%	79,85/+14,24%

Дробью в знаменателе показана относительная разница в % между рассчитанными и фактическими значениями длины.

Из таблицы 2 видно, что наиболее близки к фактическим значения, получаемые по формуле (11) как сумма длин основных отсеков корпуса. Это является следствием более полного учета конструктивных особенностей при анализе каждого отсека.

Одновременно следует отметить, что по некоторым проектам имеет место достаточно значительное отличие расчетных значений длины. Причины этих отличий могут носить объективный характер, связанный как с отличием нормативных требований, действующих на момент разработки проекта, так и с неизвестными особенностями технического задания и т.д. [10]. В то же время можно говорить и о субъективных причинах, проявляющихся в принятии различных конструкторских решений, выборе того или иного оборудования.

**Заключение**

Выполненный статистический анализ позволил получить аналитические выражения для определения в первом приближении водоизмещения, мощности и главных размерений самоходных землесосных снарядов [11]. Они могут быть использованы на начальных стадиях проектирования при решении задач обоснования целесообразности рассматриваемых судов технического флота, оптимизации их элементов и характеристик [12].

По некоторым землесосам отмеченные отличия расчетных и фактических значений имеют объективный и субъективный характер. При решении указанных выше

задач это не имеет принципиального значения, так как при вариантных решениях обеспечивается условие их сопоставимости [13].

**Список литературы:**

1. Ильин Н.И. Земснаряды / Н.И. Ильин. – М.: Транспорт, 1982. – 200 с.
2. Смирнов Е.Л. Речная справочная книжка корабельного инженера Е.Л. Смирнова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://russrivership.ru/ships/33> (дата обращения 05.02.2020)
3. Ялтанец И.М. Справочник по гидромеханизации / И. М. Ялтанец. – Изд. 3-е, испр. и доп. – Москва: Горная книга, 2011. – 736 с.
4. Шкундин Б.М. Землесосы и землесосные снаряды / Б. М. Шкундин.– М.: Госэнергоиздат, 1961. – 286 с.
5. Укоров Н.Г., Т.В. Марголин Землесосные снаряды: уч.пос. / Н.Г. Укоров, Т.В. Марголин. – Москва: Высшая школа, 1985. – 256 с.
6. Силин Н.А. Режим работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов / Н.А. Силин, С.Г. Коберник. – Киев : Изд-во Акад. наук УССР, 1962. – 215 с.
7. Иванов В.Л. Суда технического флота / В.Л. Иванов, Н.В. Лукин, С.Н. Разживин. – М.: Транспорт, 1982. – 366 с.
8. Ухова Э.П. Методология определения главных размерений различных типов земснарядов на начальной стадии проектирования: дис. ... канд. тех. наук: 05.00.00. / Э.П. Ухова. – Горький, 1972. – 143 с.
9. Ашик В.В. Проектирование судов / В.В. Ашик. – Л.: Судостроение, 1985. – 315 с.
10. Кочнев Ю.А. Определение элементов и характеристик «малых» танкеров на начальных стадиях проектирования / Ю.А. Кочнев. – Н. Новгород: Вестник ВГАВТ Выпуск 28 ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2010. – 26–34 с.
11. Dredgers of the World / Julie Simons. – United Kingdom: Oilfield Publications Limited, 1997. – 480 p.
12. Dredging: A Handbook for Engineers / R.N. Bray, A.D. Bates, J.M. Land. –United Kingdom: Elsevier Science Technology, 1996. – 448 p.

## **DETERMINATION OF ELEMENTS AND CHARACTERISTICS OF RIVER SUCTION DREDGERS AT INITIAL DESIGN STAGES**

**Ernest G. Rumyantsev**

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

**Evgeniy P. Ronnov**

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

*Abstract. The article provides a methodology for calculating the basic elements and characteristics of river dredgers at the stages of research design by means of the statistical method. For the study, the most common projects of river non-self-propelled dredgers with both a residential superstructure and without it, in a wide range of soil productivity, were used. The dependences of the total displacement and the main engine power on such basic technical data as suction dredger performance and loosening depth were analyzed in detail. Graphic dependencies and analytical expressions for determining the main suction dredger dimensions were obtained. The issue of choosing the length of the main dredger compartments is considered, which allows to solve the problem of pre-splitting the hull into compartments. The analysis of the accuracy of the obtained statistical dependencies for determining the length of the vessel is provided.*

*Keywords: suction dredger, dredger, main dimensions, length of hull compartments, mining of non-metallic materials, suction dredger performance, loosening depth.*

#### References:

1. Smirnov E.L. «Rechnaya spravocnaya knizhka korabel'nogo inzhenera Smirnova» (River reference book of a ship engineer E.L. Smirnov) Access mode: <https://russrivership.ru/ships/33> (accessed date 02/05/2020);
2. Ilyin, N.I. «Zemsnyaryady» (Dredgers) *Transport* (1982): 200;
3. Yaltanetz I.M. «Spravochnik po gidromekhanizatsii» (Hydromechanization Handbook) *Gornaya kniga* (2011): 736;
4. Shkundin B.M. «Zemlesosy i zemlesosniye snaryady» (Dredgers) *Gosenergoizdat*: (1961): 286;
5. Ukorov N.G., Margolin T.V. «Zemlesosniye snaryady» (Dredgers) *Vishya Shkola* (1985): 256;
6. Silin N.A., S.G. Kobernik «Rezhim raboty krupnykh zemlesosnykh snaryadov i truboprovodov» (Mode of operation of dredging shells and pipelines) *Izdatel'stvo akademii nauk USSR* (1962): 215;
7. V.L. Ivanov, N.V. Lukin, S.N. Razzhivin «Suda tekhnicheskogo flota» (Technical fleet vessels) *Transport* (1982):366;
8. Ukhova E.M. «Metodologiya opredeleniya glavnykh razmerenij razlichnykh tipov zemsnyaryadov na nachal'noj stadii proektirovaniya» (Methodology for determining the main dimensions of various types of dredgers at the initial design stage) *Gor'kiy* (1972): 366;
9. Ashik V.V. «Proektirovanie sudov» (Ship design) *Sudostroenie* (1985): 315;
10. Kochnev Y.A. «Opredelenie elementov i harakteristik «malyh» tankerov na nachal'nykh stadiyah proektirovaniya» (Determination of the elements and characteristics of «small» tankers in the initial stages of design) *Vestnik VGAVT Vypusk 28 FGOU VPO «VGAVT»* (2010). – 26-34;
11. Dredgers of the World / Julie Simons. – United Kingdom: Oilfield Publications Limited, 1997. – 480 p.;
12. Dredging: A Handbook for Engineers / R.N. Bray, A.D. Bates, J.M. Land. –United Kingdom: Elsevier Science Technology, 1996. – 448 p.

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

**Эрнест Георгиевич Румянцев**, магистрант кафедры «Проектирования и технологии постройки судов», Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: [gumernest@gmail.com](mailto:gumernest@gmail.com)

**Евгений Павлович Роннов**, профессор, д.т.н., заведующий кафедрой «Проектирования и технологии постройки судов», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,  
e-mail: [ptps@vgavt-nn.ru](mailto:ptps@vgavt-nn.ru)

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

**Evgeniy P. Ronnov**, professor, Head of the Department of «Design and shipbuilding technology», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 10.02.2020 г.

УДК 004.925.83

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.49>

## **ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КАРКАСНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА СУДНА В САПР КОМПАС-3D**

**А.Ю. Рыченкова**

*Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,  
г. Новороссийск, Россия*

**Е.С. Клименко**

*Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,  
г. Новороссийск, Россия*

**Л.Н. Бородина**

*Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,  
г. Новороссийск, Россия*

*Аннотация. В статье рассмотрены аспекты решения прикладных задач, связанных с возможностями автоматизированной системы КОМПАС-3D по геометрическому моделированию судостроительных объектов – поверхностей корпуса судна. Рассмотрен способ моделирования корпуса судна на основе плоских кривых – сечений, построенных на различных смещенных плоскостях. Показан способ повышения точности моделируемой каркасной поверхности корпуса судна путем введения в каркас модели промежуточных сечений. Предложены: понятие качества моделирования каркасной поверхности и методика определения количественных показателей оценки качества каркасной поверхности. Выполнена практическая реализация метода моделирования трехмерных моделей корпусов судов, а также приведены сравнительные результаты исследования качества моделирования поверхности судна.*

*Ключевые слова: трехмерное геометрическое моделирование, САПР Компас-3D, каркасная поверхность, модель корпуса судна, теоретический чертеж судна, шпангоут, ватерлиния, кривая Безье, гладкость обвода судна, промежуточные сечения, оценка качества моделирования.*

### **Введение**

Каркасные поверхности нашли широкое применение в области геометрического моделирования. К классу каркасных поверхностей относят поверхности, задаваемые дискретным множеством точек или линий, лежащих на поверхности [1]. Совокупность этих линий называется линейным каркасом или дискретной сетью. С одной стороны, такие поверхности удобны с точки зрения моделирования, так как легко строятся в любой САПР с помощью команды «поверхность по сечениям». Кроме того, исходный каркас модели обладает достаточной информативностью и наглядностью, чтобы предварительно представить моделируемую поверхность. Однако с другой стороны, особенностью поверхностей, заданных линейным каркасом, является то, что они могут быть построены только приближенно, в отличие от поверхностей вращения, например. Это объясняется тем, что точки, не принадлежащие линиям каркаса, не могут быть однозначно определены. Иными словами, между сечениями поведение поверхности непредсказуемо. В результате этого заданный каркас может иметь бесчисленное множество вариантов поверхностей, отличных друг от друга. При этом в зависимости от начальных условий и требуемой формы поверхности по данному каркасу можно построить различные по форме поверхности.

Поэтому при моделировании каркасных поверхностей особую роль играет способ формирования поверхности между сечениями. При этом качество, т.е. точность и

гладкость каркасной поверхности будет напрямую зависеть от точности и гладкости линий исходного каркаса, а также общего количества линий. Чем плотней каркас, тем точнее можно задать поверхность. На одной и той же поверхности можно задать бесконечное множество каркасов. Обычно стараются задать линии каркаса простейшей формы. С помощью линий, лежащих на поверхности, изображаются обтекаемые поверхности судов, автомобилей, самолетов, лопасти турбин и т.п.

### **Цели и задачи работы**

Целью данной работы было показать возможности отечественной универсальной САПР среднего уровня Компас-3D в области решения практических задач по трехмерному моделированию и исследованию сложных каркасных поверхностей. Как нами ранее было показано в работе [2], САПР Компас-3D обладает широчайшими возможностями для моделирования поверхностей высокой степени сложности при разработке моделей механизмов и машин, и в этой связи нас заинтересовал вопрос о применимости данной САПР в области судостроения. Также задачей данной работы было рассмотреть способы улучшения качества каркасной поверхности, а также предложить методику определения количественных характеристик качества (точности и гладкости) модели. В качестве моделируемой каркасной поверхности была взята теоретическая поверхность корпуса судна, построение которой осуществлялось в САПР Компас-3D.

### **Состояние проблемы и актуальность**

Проведенный анализ источников показал, что для моделирования поверхности корпуса судна в настоящее время используются, как правило, специализированные судостроительные САПР. Их сравнение, области применения и прикладные примеры использования достаточно широко освещены в доступных источниках, например в [2,3]. Без сомнения, самыми известными и широко используемыми являются такие «тяжелые» специализированные САПР как Foran [4] и CATIA [5,6]. В тоже время, прикладные аспекты решения задач по геометрическому моделированию судостроительных объектов в универсальных САПР, таких как Компас-3D, недостаточно раскрыты. В немногочисленных открытых источниках по этому направлению, например в [7,8], показаны лишь частные примеры использования Компас-3D в решении ограниченного круга задач геометрического моделирования корпуса судна путем создания каркасной поверхности. Имеются также примеры использования аналитических моделей для описания части обводов судна [9], которые, как мы считаем, не имеют прикладных перспектив в силу своей неоправданной сложности. Однако примеров количественного исследования трехмерной модели корпуса судна с точки зрения ее гладкости и точности нами найдено не было, поэтому мы считаем крайне актуальной задачей выработку методики определения количественных характеристик гладкости и точности моделируемой каркасной поверхности.

### **Материалы и методы**

Успешное решение задачи геометрического моделирования поверхности корпуса судна в большей степени зависит от задачи построения кривых линий, проходящих через заданное множество точек, при условии выполнения требований, накладываемых на кривые. Исходной графической информацией для моделирования корпуса судна является криволинейный каркас – теоретический чертеж корпуса судна (ТЧ), который представляет собой совокупность линий пересечения теоретической поверхности судна плоскостями, параллельными основным плоскостям проекций.

При моделировании поверхности судна в качестве каркасных сечений или формообразующих кривых нами были использованы линии шпангоутов. При этом качество моделируемой поверхности судна напрямую зависит от качества исходных кривых

шпангоутов. В этой связи главными требованиями, предъявляемыми к кривым шпангоутов, являются их точность и гладкость. Также по этим же показателям мы предлагаем проводить проверку качества полученных трехмерных моделей корпуса судна.

В практике геометрического моделирования поверхностей формообразующие кривые иначе называются обводами. Обвод – это кривая, составленная из дуг различных кривых, состыкованных между собой определенным образом [11]. От способа стыковки будет зависеть главное свойство обвода – его гладкость. Чем выше гладкость обводов судна, тем более гладкая, а значит, качественная будет поверхность, моделируемая по этим обводам.

Гладкость кривой каркаса отчасти можно достичь использованием кривой Безье для построения заданного обвода корпуса, так как изначально принцип построения этой кривой подразумевает обеспечение непрерывности и гладкости аппроксимирующей линии, проходящей через заданные точки (узлы) [12]. При этом обвод судна будет являться составной кривой Безье, гладкость которой определяется степенью сглаженности в узлах, где соединяются два сегмента кривой. Важным свойством составной кривой Безье является то, что стыковка сегментов происходит автоматически в процессе построения узлов из условия непрерывности и сглаженности узла. Узел считается сглаженным, если входящая и исходящая касательные в данном узле лежат на одной прямой. В общем случае под степенью гладкости понимают число совпавших производных стыкующихся кривых в точках стыка [12]. Иными словами, если в узле совпадают вторые производные, то говорят о второй степени гладкости кривой. Таким образом, в системе КОМПАС-3D при построении кривой Безье изначально обеспечивается лишь первый порядок гладкости в узлах [13].

Главным условием обеспечения требуемой точности поверхности корпуса судна при построении линий каркаса с помощью кривой Безье является, то, что её узлы должны лежать на заданном шпангоуте. На этом этапе моделирования возникает задача выбора количества узлов, задающих обвод. При этом чем большим количеством узлов задается шпангоут, тем точнее воспроизводится его форма, и тем точнее будет моделируемая поверхность. С другой стороны, при увеличении числа промежуточных узлов кривой Безье трудней обеспечить ее высокий порядок гладкости и, как следствие, снижается степень гладкости получаемой поверхности. Так как основной целью моделирования поверхности корпуса судна в данной работе является ее точность, то при условии достаточно большого количества узлов кривой каркаса особое значение будет иметь обеспечение ее гладкости.

В САПР Компас 3D имеется возможность моделирования каркасных поверхностей различными способами [14]. В данной работе будет рассмотрен способ построения поверхности по сечениям.

### **Моделирование исходной поверхности по заданному теоретическому чертежу**

При моделировании корпуса судна по сечениям в качестве формообразующих сечений были использованы данные шпангоуты, скопированные из исходного теоретического чертежа в соответствующие эскизы на параллельных плоскостях. При этом параллельные смещенные плоскости располагаются на расстоянии длины теоретической шпации, т.е. на расстоянии между шпангоутами. Первым эскизом будет точка, соответствующая крайней точке носа судна. Она будет иметь большое значение при дальнейшем исследовании в качестве базовой точки. Последний 20-й шпангоут проходит через ось вращения руля, в то время как крайняя оконечность кормы не вполне определена. Поэтому для более точного моделирования кормовой части поверхности корпуса был построен дополнительный 21-й шпангоут на исходном ТЧ, проекционными методами по точкам его пересечения с ватерлиниями. Совокупность сечений, образующих криволинейный каркас моделируемой поверхности показана на рисунке 1а.

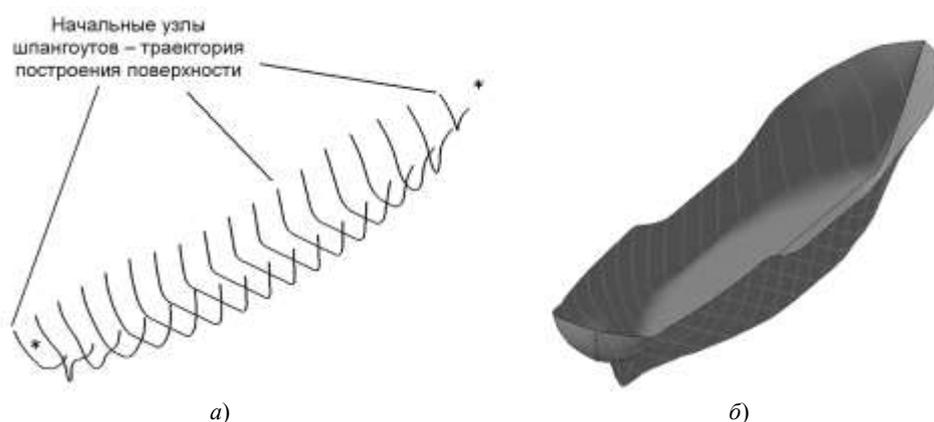


Рис. 1. Криволинейный каркас и поверхность корпуса судна по сечениям

На рис. 1 б) показана исходная поверхность по сечениям корпуса судна, полученная на основе заданного теоретического чертежа.

### Оценка качества исходной поверхности

Для оценки гладкости и точности полученной поверхности использовались контрольные сечения поверхности судна плоскостями, параллельными горизонтальной плоскости проекций – т. е. ватерлинии, а также сечения поверхности судна плоскостями, параллельными вертикальной плоскости, т.е. батоксы. Эти же линии заданы на теоретическом чертеже. При помощи контрольных сечений, не совпадающих с сечениями каркаса, можно судить не только о гладкости полученной поверхности, но и о точности ее моделирования, так как в качестве секущих плоскостей для контрольных сечений были взяты плоскости заданных ватерлиний и батоксов.

Построение батоксов и ватерлиний с модели производилось с помощью команды «Кривая пересечения поверхностей», где в качестве секущих плоскостей были взяты плоскости заданных ватерлиний и батоксов. Для оценки точности формы носовой и кормовой частей судна модели в сравнении с заданной на теоретическом чертеже был построен главный обвод судна как кривая пересечения поверхности с вертикальной продольной плоскостью проекций (Рис. 2).



Рис. 2. Контрольные сечения батоксов и заданный обвод судна

Для удобства анализа и сравнения линий контрольных сечений все батоксы и главный обвод судна были спроецированы на одну плоскость вспомогательного эскиза, а во второй вспомогательный эскиз – все контрольные ватерлинии, а также линия верхней палубы. Проведя анализ формы полученных ватерлиний и батоксов можно сказать, что построенная поверхность по сечениям обладает достаточной гладкостью, однако не обеспечивает заданную форму носовой и кормовой частей, а также линии палубы как это видно на рис. 3.

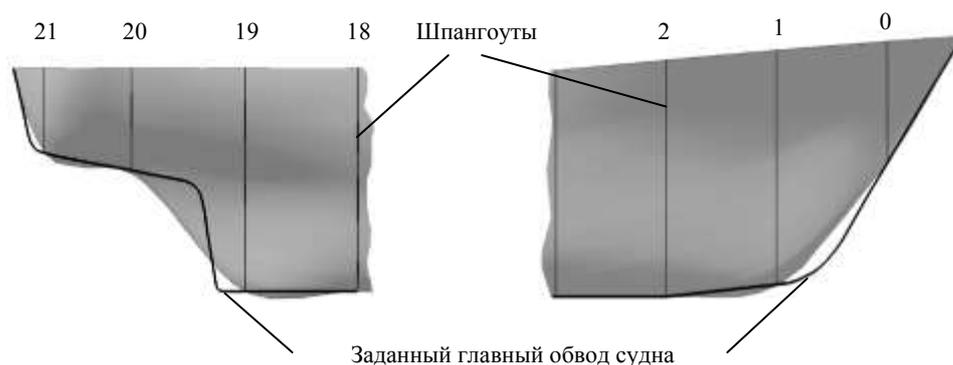


Рис. 3. Отклонение формы кормы и носа исходной поверхности от заданной на ТЧ

Основная проблема при моделировании корпуса возникает в области оконечности кормовой части, где имеется резкое изменение кривизны заданной линии главного обвода судна, как показано на рисунке 3 слева. В носовой части также происходит отклонение от заданной формы главного обвода (рисунок 3 справа). Так же, как и при построении плоской кривой Безье, на поверхности в области перехода от криволинейного обвода к прямолинейному возникает выпуклость, как это видно на рисунке 6 между 18 и 19-м, также между 1 и 2-м шпангоутами. Это объясняется тем, что в процессе моделирования поверхности по сечениям на каркас как бы натягивается поверхность Безье, поэтому возникают те же проблемы, что и при моделировании плоской кривой Безье. На этом примере хорошо иллюстрируется главный недостаток моделирования каркасных поверхностей только лишь по одному семейству линий: неизвестно поведение поверхности между сечениями. При этом форма поверхности между сечениями будет обусловлена лишь критерием максимально возможной гладкости получаемой поверхности.

### Способ повышения качества каркасной поверхности

По нашему мнению, наиболее целесообразным способом повышения качества каркасной поверхности данного типа является введение дополнительных промежуточных сечений, которые будут определять форму поверхности между заданными шпангоутами. Выбор положения дополнительных сечений будет зависеть от величины отклонения обвода от заданного. Так, на рисунке 3 видно, что поверхность имеет наибольшее отклонение от заданной формы между 19 и 18, 19 и 20, а также между 0, 1 и 2 шпангоутами. Чтобы получить каждое промежуточное сечение, необходимо на заданном теоретическом чертеже в соответствующем месте построить дополнительный шпангоут с помощью проекционных методов начертательной геометрии по точкам их пересечения с ватерлиниями. На теоретическом чертеже в соответствующих местах были построены дополнительные шпангоуты, как показано на рисунке 4. Все полученные таким образом промежуточные шпангоуты были отредактированы для обеспечения плавности обводов.

Таким образом, методика улучшения качества каркасной поверхности путем введения дополнительных сечений проходила в несколько этапов. На первом обеспечивалась требуемая точность и плавность заданных сечений. На втором, в месте наибольшего абсолютного отклонения главного обвода между шпангоутами, вводилось одно дополнительное сечение. Так, на втором этапе были добавлены всего 5 дополнительных сечений между упомянутыми выше шестью шпангоутами. Затем новое контрольное сечение главного обвода судна повторно сравнивалось с заданным и при условии превышения наибольшего отклонения требуемому делался вывод о необхо-

димости введения новых дополнительных сечений. Однако при увеличении количества сечений происходит снижение гладкости поверхности, поэтому критерием при выборе количества дополнительных сечений было достижение требуемой точности при обеспечении достаточной гладкости модели. С учетом этого условия понадобилось всего два шага увеличения количества сечений. После предварительной оценки поверхности с дополнительными сечениями можно сделать вывод, что введение промежуточных сечений позволяет достаточно точно воспроизвести форму кормовой и носовой частей судна.

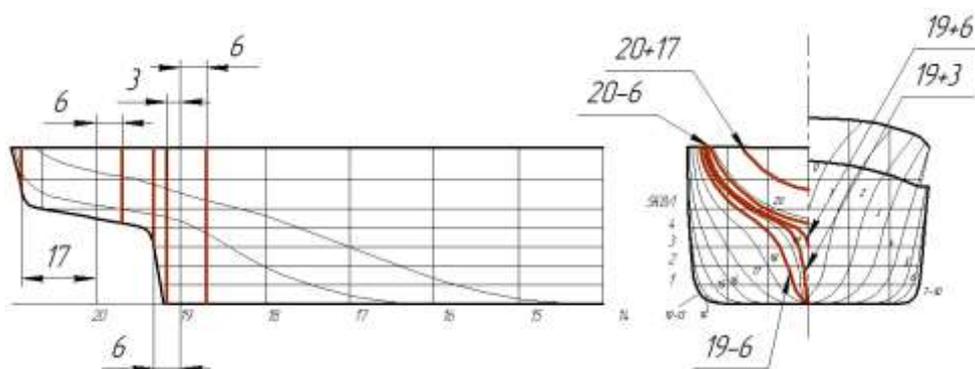


Рис. 4. Построение дополнительных сечений на теоретическом чертеже

#### Методика количественной оценки качества каркасных поверхностей

Плавность и точность моделируемых поверхностей, иными словами, их качество, однозначно можно оценить по плавности и точности контрольных сечений, т.е. ватерлиний и батоксов, полученных с моделей в сравнении с заданными на ТЧ. А введение количественных оценок этих показателей позволит говорить о количественной оценке качества моделируемой поверхности. При этом заданные на ТЧ обводы изначально проектировались достаточно плавными и поэтому могут быть использованы в качестве образца для сравнения по данному показателю. Для количественной оценки плавности и точности построенных поверхностей мы предлагаем использовать следующие показатели:

- максимальное абсолютное отклонение от заданного обвода;
- площадь, ограниченную между контрольным сечением и заданным обводом;
- количество точек пересечения полученного и заданного обвода.

Отклонение от заданного обвода можно найти с помощью команды «Расстояние от точки до кривой», указав при этом одну из кривых и, не фиксируя точку, в процессе перемещения вдоль второй кривой, зафиксировать максимальное значение определяемого расстояния. Интегральной оценкой точности является общая площадь фигуры, ограниченной контрольным и заданным обводом. При этом, если значение площади с одной стороны заданного обвода значительно отличается от величины площади с другой стороны, можно говорить о наличии смещения контрольного сечения в ту или другую сторону от осевой линии сечения. Эти три показателя однозначно характеризуют точность при моделировании поверхности в САПР Компас-3D – чем они меньше, тем ближе контрольный обвод, а значит и вся поверхность, к заданной форме. Ситуация, когда вся кривая контрольного сечения расположена с одной стороны от заданного обвода, т.е. одна из площадей равна нулю, в данном случае невозможна, так как обязательно должны присутствовать точки пересечения контрольного сечения с кривыми каркаса – заданными шпангоутами. Эти точки являются также узлами сети кривых. Таким образом, общее количество точек пересечения контрольной и заданной кривой обвода не может быть меньше числа шпангоутов, с которыми пересекает-

ся данная линия на поверхности судна. В этой связи косвенным показателем плавности кривой контрольного сечения может служить разность общего количества точек пересечения и количества шпангоутов. Чем она больше, тем чаще линия контрольного сечения пересекается с заданной линией, а значит, чаще меняется знак второй производной, что является признаком снижения плавности. Результаты оценки качества двух поверхностей (по заданным шпангоутам и с дополнительными шпангоутами) сведены в таблицу 1.

Для более объективной оценки качества полученной модели были построены контрольные сечения (ватерлинии и батоксы) в модели с дополнительными сечениями (Рис. 5). Далее каждая основная линия судна обеих моделей была сравнена с соответствующей заданной линией с теоретического чертежа. Например, на рис. 5 показаны ватерлинии с исходной модели (сверху) и полученной (снизу) в сравнении с заданными линиями (толстая линия).

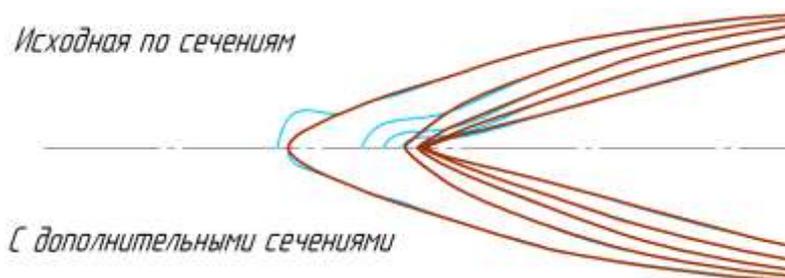


Рис. 5. Контрольные сечения ватерлиний в сравнении с заданными на ТЧ

Для количественной оценки точности моделирования была определена общая площадь между заданной линией и полученной с модели, как показано на рис. 6. Очевидно, чем меньше эта площадь, тем выше точность модели. Количественной оценкой гладкости модели может служить число точек пересечения этих двух линий. Следует отметить, что значения интегральной ошибки были получены с учетом масштаба теоретического чертежа и имеют относительный характер. Таким образом, было показано, что добавление промежуточных шпангоутов значительно повышает точность каркасной модели при незначительном снижении гладкости.



Рис. 6. Определение интегральной ошибки моделирования поверхности судна

### Результаты

В ходе данного исследования, были получены следующие результаты. Было показано, что заданных на ТЧ шпангоутов недостаточно для моделирования поверхности, обеспечивающей требуемую точность. Так, наибольшая ошибка моделирования присутствует в кормовой и носовой частях судна. Была рассмотрена методика построения дополнительных (промежуточных) шпангоутов в указанных местах наибольшего изменения кривизны обвода судна. В данной работе мы показали, что добавление в каркас определенных промежуточных шпангоутов значительно повышает точность каркасной модели при незначительном снижении гладкости. В работе предложена методика количественной оценки качества моделируемой каркасной поверхности судна. Проведен сравнительный анализ точности и гладкости исходной модели и модели с дополнительными сечениями. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты количественной оценки точности и гладкости моделей

	Точность – Интегральная ошибка		Гладкость – число точек пересечения линий	
	Исходная	С дополнительными сечениями	Исходная	С дополнительными сечениями
1 ватерлиния	16,5459	8,22099	9	12
2 ватерлиния	24,1145	6,2754	7	9
3 ватерлиния	33,1860	3,2900	8	11
4 ватерлиния	66,0308	5,2218	12	14
5 ватерлиния	44,1027	12,7951	10	8
Сумма по ватерлиниям	183,9801	35,8035	46	54
1 батокс	98,1749	32,1652	9	11
2 батокс	99,7431	36,2728	8	12
Главный обвод	127,6991	59,3739	10	12
Сумма по батоксам	325,6172	127,8120	27	35
Общая сумма	707,5154	232,0536	73	89

### Заключение

Предложенная методика по оценке количественных характеристик качества каркасной поверхности может иметь практическое применение в задачах геометрического моделирования широкого класса каркасных поверхностей.

### Список литературы:

1. Нартова Л.Г. Начертательная геометрия: учеб. пособие для студ. техн. специальностей вузов / Л.Г. Нартова, В.И. Якунин. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с., ил. ISBN 978-5-7695-6665-3.
2. Клименко Е.С., Бородина Л.Н., Рыченкова А.Ю. Прикладное использование систем автоматизированного проектирования при моделировании механизмов и машин на морском транспорте // Вестник ВГАВТ. – 2018. – №57. – С. 38-44.
3. Абдулин А.Я., Сенюшкин Н.С., Суханов А.В., Ямалиев Р.Р. Системы автоматизированного проектирования как инструмент решения наукоемких конструкторских задач судостроения / Вестник ВГТУ. 2010. №10.
4. Бубнов А. САПР в судостроении // САПР и Графика №5 2000.
5. LIN R. et al. Application of the Foran software on the engineer design [J] //Machinery. – 2011. – №8. – С. 8.

6. Dong-mei C.K.Z., Rui-xi W.U. Elementary introduction of CATIA software's application on ship-building //Journal of Qingdao Ocean Shipping Mariners College. – 2008. – Т. 4.
7. Ginnis A.I. et al. A CATIA® ship-parametric model for isogeometric hull optimization with respect to wave resistance //Proceedings of the International Conference on Computer Applications in Ship-building, Trieste, Italy. – 2011. – С. 20-22.
8. Дмитриев С.А. Создание теоретического чертежа корпуса судна с использованием САПР КОМПАС / С.А. Дмитриев, В.Л. Раков, С.В. Чехович // СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2015.
9. Горавнева Т., Семенова-Тян-Шанская В. Моделирование корпуса судна в САПР КОМПАС 3D // САПР и Графика №4 2019
10. Пец Н.Г. Аналитическая трехмерная модель носовой оконечности судов ледового плавания и ледоколов // Вестник ИШ ДВФУ. 2018. №4 (37).
11. Талалай П.Г. Компьютерный курс начертательной геометрии на базе КОМПАС-3D-3D. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 608 с.: ил.+DVD. ISBN 978-5-9775-0440-9.
12. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. – М.: Издательство физико-математической литературы, -2002. – 472 с.- ISBN 5-94052-048-0.
13. Батурина Е.В., Плонский П.Л. Моделирование кривых в современных системах автоматизированного проектирования // Вестник ИрГТУ. 2006. №4 (28).
14. КОМПАС 3D V16. Руководство пользователя // М.: ООО «АСКОН – Системы проектирования», 2015.

## **GEOMETRIC MODELING AND QUALITY ASSESSMENT OF THE HULL FRAME SURFACE IN COMPASS-3D CAD**

**Anna Yu. Rychenkova,**

*Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia*

**Ekaterina S. Klimenko**

*Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia*

**Lyudmila N. Borodina**

*Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia*

*Abstract .The article deals with aspects of solving applied problems related to the capabilities of the automated COMPASS 3D system for geometric modeling of shipbuilding objects-vessel hull surfaces. The method for the ship's hull modeling based on flat curves, sections constructed on different offset planes is considered. A method is shown for improving the accuracy of the simulated frame surface of the ship's hull by introducing intermediate sections into the model frame. The concept of the modeling quality of the frame surface and the method of determining quantitative indicators for evaluating the frame surface quality are proposed. The practical implementation of the method of three-dimensional modeling of ship hulls is performed, and the comparative research results on the quality of the ship's surface modeling are presented.*

*Keywords: three-dimensional geometric modeling, Compass-3D CAD, frame surface, ship hull model, theoretical drawing of the ship, frame, waterline, Bezier curve, smoothness of the ship's outline, intermediate sections, modeling quality assessment.*

### **References**

1. Nartova L.G. Nachertatel'naya geometriya: ucheb. posobie dlya stud. texn. special'nostej vuzov / L.G. Nartova, V.I. Yakunin. – М.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2010. 288p.
2. Klimenko E.S., Borodina L.N., Ry'chenkova A.Yu. Prikladnoe ispol'zovanie sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya pri modelirovanii mexanizmov i mashin na morskom transporte (Applied use of computer-aided design systems for modeling mechanisms and machines in marine transport) Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta 57 (2018): 38-44.
3. Abdulin A. Ya., Senyushkin N. S., Suxanov A. V., Yamaliev R. R. Sistemy' avtomatizirovannogo proektirovaniya kak instrument resheniya naukoemkix konstruktorskix zadach sudostroeniya (Computer-aided design systems as a tool for solving science-intensive design problems in shipbuilding) Vestnik Voronezhskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet 10 (2010).

4. Andrej Bubnov. SAPR v sudostroenii (Computer-aided design systems in shipbuilding) Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya i grafika 5 (2000).
5. LIN R. et al. Application of the Foran software on the engineer design [J] Machinery 8 (2011).
6. Dong-mei C. K. Z., Rui-xi W. U. Elementary introduction of CATIA software's application on shipbuilding Journal of Qingdao Ocean Shipping Mariners College Vol.4 (2008).
7. Ginnis A. I. et al. A CATIA® ship-parametric model for isogeometric hull optimization with respect to wave resistance Proceedings of the International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Trieste, Italy (2011): 20-22.
8. Dmitriev S.A. Sozdanie teoreticheskogo chertezha korpusa sudna s ispol'zovaniem SAPR KOMPAS. – SPb.: SPBGMTU, 2015.
9. Tat'yana Goravneva, Vera Semenova-Tyan-Shanskaya. Modelirovanie korpusa sudna v SAPR KOMPAS 3D (Ship hull modeling in COMPASS 3D CAD) Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya i grafika 4 (2019).
10. Pecz Nikolaj Gennad'evich Analiticheskaya trexmernaya model' nosovoj okonechnosti sudov ledovogo plavaniya i ledokolov (Analytical three-dimensional model of the bow end of ice vessels and icebreakers) Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta 4 (2018).
11. Talalaj P.G. Komp'yuternyj kurs nachertatel'noj geometrii na baze KOMPAS-3D-3D. – SPb.: BVV-Peterburg, 2010. 608p.
12. Golovanov N.N. Geometricheskoe modelirovanie. – M.: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury', 2002. 472 p.
13. Baturina E.V., Plonskij P.L. Modelirovanie krivy'x v sovremenny'x sistemax avtomatizirovannogo proektirovaniya (Curve modeling in modern computer-aided design systems) Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta 4 (2006).
14. KOMPAS 3D V16. Rukovodstvo pol'zovatelya. – M.: OOO «ASKON – Sistemy' proektirovaniya», 2015.

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

**Анна Юрьевна Рыченкова**, к.т.н.,  
доцент, кафедра «Механика и инженерная графика», Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф.Ушакова,  
353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93  
e-mail: anar4230@mail.ru

**Екатерина Сергеевна Клименко** к.т.н.,  
доцент, кафедра «Механика и инженерная графика», Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,  
353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93  
e-mail: kati.klim@mail.ru

**Людмила Николаевна Бородина**, к.п.н.,  
доцент, кафедры «Механика и инженерная графика», Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф.Ушакова,  
353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93  
e-mail: ludmilasemergey@mail.ru

**Anna Yu. Rychenkova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Mechanics and Engineering Graphics», Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353918, Russia

**Ekaterina S. Klimenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Mechanics and Engineering Graphics», Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin av., Novorossiysk, 353918, Russia

**Lyudmila N. Borodina**, Ph.D. in Pedagogy Science, Associate Professor of the Department «Mechanics and Engineering Graphics», Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin av., Novorossiysk, 353918, Russia

Статья поступила в редакцию 06.02.2020 г.

УДК 620.193.16: 629.12.037.11

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.12>

## ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННОГО ФАКТОРА НА КАВИТАЦИОННУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ ДЛЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

**Ю.Н. Цветков**

Государственный университет морского и речного флота  
им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2089-1299>

**Е.О. Горбаченко**

Государственный университет морского и речного флота  
им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4117-3341>

**Р.Н. Ларин**

Государственный университет морского и речного флота  
им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

*Аннотация. Исследована кавитационная износостойкость нержавеющей стали 08Х14НДЛ, бронзы БрА8Мц11ЖЗН2Л и латуни ЛЦ40Мц3Ж в пресной воде и морской воде разных составов. Опыты проводились на магнитострикционном вибраторе при частоте колебаний концентратора около 22 кГц; амплитуду колебаний его торца можно было варьировать от 12 до 27 мкм, расстояние между торцом концентратора и поверхностью образцов равнялась 0,5 мм. Показано, что с увеличением амплитуды колебаний торца концентратора отношение износа в морской воде к износу в пресной воде снижается. На примере латуни продемонстрировано, что в жёстких условиях кавитационного воздействия, которым соответствуют испытания на магнитострикционном вибраторе при амплитуде колебаний равной 27 мкм, кавитационный износ в морской воде может быть существенно ниже, чем в пресной. Указанный парадокс объясняется, по всей видимости, особенностями испытаний на ультразвуковых магнитострикционных вибраторах в сочетании с пластифицирующим действием агрессивной жидкости. Ультразвуковая частота воздействия на поверхность ударных волн увеличивает подвижность дислокаций, а стравливание поверхностных слоёв в морской воде облегчает их разрядку на поверхности: имеет место хемомеханический эффект.*

*Ключевые слова: кавитационное изнашивание, металлический сплав, гребной винт, ультразвуковой магнитострикционный вибратор, морская вода, пресная вода, микротвёрдость, хемомеханический эффект.*

### 1. Введение

Кавитационное изнашивание – одна из распространённых причин ремонта элементов судовых движительных комплексов: гребных винтов и направляющих насадок [1]. Особенность кавитационного изнашивания гребных винтов (ГВ) в том, что часто оно происходит в морской воде, являющейся сильным электролитом, поэтому наряду с кавитационным воздействием металлическая поверхность подвергается электрохимической коррозии. Этим объясняется тот факт, что при проведении лабораторных испытаний сплавов ГВ на кавитационную износостойкость для воспроизведения коррозионного действия используют не пресную, а искусственную морскую воду, состав которой варьируют от простейших водных растворов  $NaCl$  разных концентраций до сложных композиций, сравнительно точно воспроизводящих состав морской воды [2, 3].

Следует отметить, что в опытах на электрохимическую коррозию вместо морской воды часто используют 3,5% раствор  $NaCl$ , который, к примеру, по отношению к углеродистой стали, показал себя в несколько раз более агрессивным, чем морская вода

[4]. Это связано с присутствием в морской воде ионов  $Ca^{+2}$  и  $Mg^{+2}$ , которые способствуют образованию на поверхности известковых осадков, препятствующих диффузии кислорода к поверхности [5]. Однако не для всех сплавов это так, например, для алюминиевой латуни морская вода, наоборот, более агрессивна, чем 3,5 % раствор  $NaCl$ , что, по-видимому, объясняется недостаточно сильным изменением  $pH$  в слое воды у поверхности латуни для образования известковых осадков [6]. При кавитационном изнашивании, в отличие от коррозии, металлическая поверхность подвергается совместному действию механического и коррозионного факторов. Кавитационное воздействие препятствует образованию на поверхности отложений из продуктов коррозии, поэтому в условиях кавитации коррозионное воздействие растворов неорганических солей отличается от коррозии в статических условиях. Например, дуплексная нержавеющая сталь для гребных винтов имеет более высокую коррозионную стойкость в 3,5% водном растворе  $NaCl$ , чем алюминий-никелевая бронза, но при одновременном кавитационном воздействии бронза показывает более высокую коррозионную стойкость, чем нержавеющая сталь [7]. При этом при одновременном действии коррозии и механического фактора возникает синергетический эффект [7], проявляющийся по-разному на разных сплавах.

В настоящее время отсутствуют методические основы, позволяющие в точности воспроизводить в лабораторных условиях такой же механизм разрушения поверхности при совместном действии механического и коррозионного факторов, какой имеет место при кавитационном изнашивании натуральных объектов. Считается, что из-за кратковременности лабораторных опытов, по сравнению с условиями кавитационного изнашивания натуральных объектов, в этих опытах не в полной мере проявляется влияние коррозии на кавитационный износ. В разное время предлагались различные способы учёта коррозионного фактора: сочетанием периодов кавитационного воздействия с более продолжительными периодами статической выдержки образцов в жидкости [8, 9], снижением интенсивности кавитационного воздействия при постоянном уровне коррозионной активности жидкости [10] или наоборот, интенсификацией электрохимической коррозии с помощью анодной поляризации образца при постоянном уровне механического воздействия [11–14]. Однако у всех этих способов один общий недостаток: при их использовании добиваются одинакового соотношения потерь металла от коррозионного и механического факторов, не обращая внимания на обеспечение одинаковой природы разрушения поверхности металла в натуральных условиях и лаборатории [10]. Проблема усложняется разнообразием типов установок, применяемых для испытаний на кавитационный износ [15], причём в пределах каждого типа они могут различаться по своим параметрам. На каждой установке могут проявляться свои специфические особенности. В последнее время в большинстве случаев используются ультразвуковые магнитострикционные вибраторы (МСВ) [16], как правило, с частотой колебаний концентратора в диапазоне от 18 до 22 кГц.

Ультразвуковые МСВ обладают рядом преимуществ, которые обеспечили им широкое распространение. Однако при испытании на МСВ с применением искусственной морской воды на некоторых режимах получаются результаты, которые трудно объяснить, в частности, такие, как увеличение износа при переходе от испытаний в искусственной морской к испытаниям в пресной воде. Проявлению таких эффектов способствуют следующие факторы: 1) ультразвуковая частота; по всей видимости, она оказывает влияние на механизм упрочнения и разрушения поверхности металла; 2) малая толщина поверхностного слоя, пластически деформируемого при испытании на ультразвуковом МСВ из-за малого размера кавитационной зоны и 3) коррозионное воздействие на поверхность. Строго говоря, ни один из перечисленных факторов нельзя рассматривать изолированно, так как они действуют одновременно. Тем не менее, влияние первых двух факторов на поведение испытываемых на МСВ металлов выражено проявляется только при наличии агрессивной среды.

Целью настоящей работы является исследование влияния электрохимической

коррозии на кавитационную износостойкость сплавов, применяемых для ГВ, в условиях ультразвуковой кавитации.

## 2. Методика эксперимента

Кавитационное изнашивание осуществляли на ультразвуковом МСВ при частоте колебаний концентратора, равной примерно 22 кГц (рис. 1). Образец 1 устанавливали в оправку 2 и крепили винтом 3. Саму оправку устанавливали в ёмкость 4, в которую заливали воду 5. Амплитуду колебаний торца концентратора 6, определяющую интенсивность кавитационного воздействия, можно было варьировать примерно от 12 до 27 мкм.

Для испытания выбрали три сплава: бронзу «Новостон» (БрА8Мц11ЖЗН2Л), латунь ЛЦ40Мц3Ж и сталь 08Х14НДЛ. Образцы из стали вырезали из лопасти гребного винта, бывшего в эксплуатации, они имели цилиндрическую форму диаметром около 17 мм. Латунь и бронзу отливали в электропечи, а образцы, вырезанные из отливки, представляли собой призмы квадратного сечения размером 15×15×8.

Плоские поверхности образцов, подвергаемые кавитационному воздействию, перед испытаниями шлифовали на шкурках разной зернистости, а потом полировали на сукне. Расстояние  $Z$  между поверхностью образца и торцом концентратора (рис. 1) в опытах выставляли равным 0,5 мм.

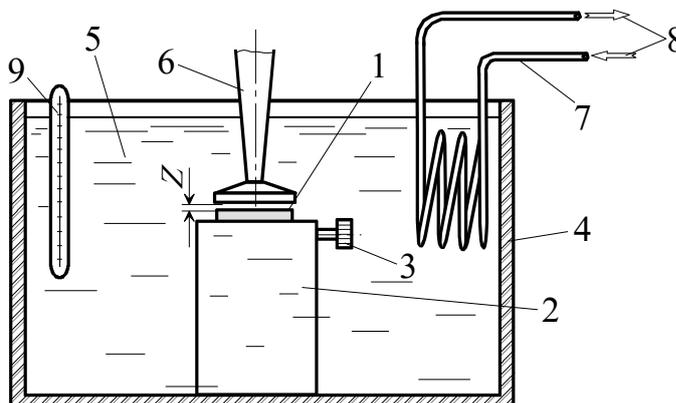


Рис. 1. Схема испытаний на кавитационную износостойкость

В процессе испытаний воду в ёмкости охлаждали с помощью змеевика 7, через который пропускали водопроводную воду 8. Температуру поддерживали равной  $20 \pm 3$  °С и контролировали с помощью термометра 9.

Эксперименты проводили в мягкой пресной воде, 3 % водном растворе  $NaCl$  и искусственной морской воде (см. таблицу).

В процессе испытаний МСВ периодически выключали, образцы вынимали из рабочей ёмкости, промывали в мягкой пресной воде, высушивали и взвешивали на аналитических весах ВЛР-200, имеющих дискретность показаний 0,05 мг. По потерям массы определяли износ. На каждом режиме испытывали по два образца, а за окончательный результат брали среднее арифметическое значение.

## 3. Анализ результатов экспериментов

Первая серия опытов состояла в сравнительных испытаниях сплавов в пресной воде и в 3 % растворе  $NaCl$ . Как следует из работы [9], стойкость металлов к кавитационному воздействию снижается при повышении содержания  $NaCl$  в воде, однако при превышении концентрацией значения, равного 3 %, дальнейшее повышение содержания хлорида натрия не приводит к заметному увеличению износа. То есть,

наименьшая кавитационная износостойкость из всех растворов, моделирующих морскую воду, получается в водных растворах, содержащих от трёх и более процентов  $NaCl$ .

По результатам первой серии опытов было установлено, что для всех сплавов, указанных в предыдущем разделе, с увеличением амплитуды колебаний отношение потерь массы  $\Delta M_{NaCl}$  в 3 % растворе  $NaCl$  к потерям массы  $\Delta M_{пр}$  в пресной воде уменьшается (рис. 2).

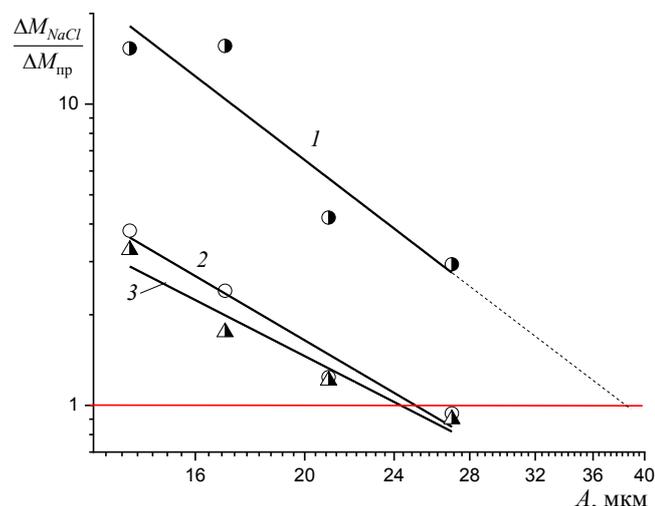


Рис. 2. Зависимость отношения потерь массы в 3 % растворе  $NaCl$  к потерям массы в пресной воде от амплитуды колебаний торца концентраторов после 6 ч испытаний на ультразвуковом МСВ:  
1 – бронза БрА8Мц11ЖЗН2Л; 2 – латунь ЛЦ40Мц3Ж;  
3 – сталь 08Х14НДЛ

Как следует из рис. 2, для стали 08Х14НДЛ и для латуни при амплитуде, превышающей 27 мкм, наметилась тенденция перехода этого соотношения через значение, равное единице, т. е. при определённых условиях можно получить износ в коррозионно-активной жидкости существенно ниже, чем в пресной воде. Для алюминиевой бронзы, судя по рис. 2, можно предположить, что отношение  $\Delta M_{NaCl} / \Delta M_{пр}$  достигнет единицы при  $A \approx 40$  мкм.

Важно отметить, что до настоящего времени ни в одной из работ, известных авторам, не было зарегистрировано заметно меньшего кавитационного износа в агрессивной жидкости по сравнению с испытаниями в пресной воде. Тем не менее, как видно из рис. 2, гипотетически представляется возможным получить соотношение  $\Delta M_{NaCl} / \Delta M_{пр}$  заметно ниже единицы: это можно сделать или увеличением амплитуды колебаний, или уменьшением коррозионной активности жидкости.

Так как увеличение амплитуды колебаний более 27 мкм в настоящих опытах оказалось невозможным из-за ограниченной мощности установки, то было принято решение уменьшить коррозионную активность жидкости. И следующая серия опытов состояла в сравнительных испытаниях латуни ЛЦ40Мц3Ж в искусственной морской и пресной воде. Как известно, морская вода уступает по коррозионной активности в условиях кавитации 3 % раствору  $NaCl$  [2, 17]. При этом следует отметить, что если в первой серии опытов использовали цельнометаллическую оправку из алюминиевой бронзы (см. рис. 1, поз. 2), то во второй серии для испытаний в морской воде верхнюю часть оправки, в которой крепился образец, изготовили из капролона и только нижнюю – для устойчивого положения оправки на дне ёмкости – из бронзы. Тем са-

мым дополнительно снизили влияние коррозионного фактора на поверхность латуни, так как исключили контактную коррозию между оправкой и латунюю.

Существуют различные рекомендации по составу искусственной морской воды для лабораторных испытаний [18, 19]: для настоящих опытов морскую воду готовили в соответствии с работой [19] (таблица).

Таблица

Состав искусственной морской воды [19]

Соль	Концентрация (г/л)
Хлорид натрия $NaCl$	24,6
Хлорид калия $KCl$	0,67
Двухводный хлорид кальция $CaCl_2 \times 2H_2O$	1,36
Семиводный сульфат магния $MgSO_4 \times 7H_2O$	6,29
Шестиводный хлорид магния $MgCl_2 \times 6H_2O$	4,66
Бикарбонат натрия (сода) $NaHCO_3$	0,18

При сравнительных испытаниях латуни в морской и пресной воде регистрировали не только изменение потерь массы латуни с течением времени кавитационного воздействия, но и изменение микротвёрдости поверхности в течение инкубационного периода. И в морской, и в пресной воде испытывали по два образца латуни. Значения микротвёрдости определяли на микротвердомере ПМТ-3 при трёх нагрузках на индентор Виккерса: 0,196; 0,49 и 0,98 Н. При каждой нагрузке наносили шесть отпечатков – по три отпечатка на каждом из двух испытанных образцов – всего 18 отпечатков, и за результат брали среднее арифметическое значение. Измерения заканчивали, когда на поверхности образовывался рельеф, не позволяющий наносить чёткие по форме отпечатки индентора.

Как видно из графиков рис. 3, при переходе от пресной воды к искусственной морской износ латуни ЛЦ40Мц3Ж снизился на треть; на рис. 3 штриховкой показаны полосы разброса результатов, условно ограниченные результатами испытаний первого и второго образцов: видно, что полосы разброса даже не перекрываются. Таким образом, на примере латуни ЛЦ40Мц3Ж подтверждено, что действительно при определённых сочетаниях коррозионной активности жидкости и интенсивности кавитационного воздействия можно получить снижение кавитационного износа сплава при переходе от пресной воды к морской воде; это сочетание, видимо, является индивидуальным для каждого сплава. То есть, результаты испытаний стали 08Х14НДЛ и латуни ЛЦ40Мц3Ж, соответствующие  $A = 27$  мкм, представленные на рис. 2, на котором видно, что при указанной амплитуде износ в 3% растворе  $NaCl$  несколько снизился по сравнению с износом в пресной воде, не являются случайными и их нельзя объяснить погрешностью эксперимента.

Заметное снижение износа латуни при переходе от пресной к морской воде (рис. 3) указывает на пластифицирующее действие морской воды на поверхность металлов: имеет место хемомеханический эффект [20] и, по всей видимости, так ярко он проявляется только при испытаниях на ультразвуковых МСВ. Анализ изменения микротвёрдости  $H_\mu$  в пределах инкубационного периода (рис. 4) показал, что кинетика упрочнения латуни одинакова как в морской, так и в пресной воде: сначала микротвёрдость возрастает, достигает максимального значения, а потом снижается и «выходит» на постоянное значение. Момент, когда микротвёрдость изнашиваемой поверхности принимает постоянное значение, соответствует окончанию инкубационного периода (линии 2 и 2'). Таким образом, инкубационный период можно разбить на две стадии: стадию упрочнения и стадию разупрочнения; такая кинетика подтверждается и результатами измерений остаточных напряжений в поверхностных слоях [21, 22] при кавитационном воздействии.

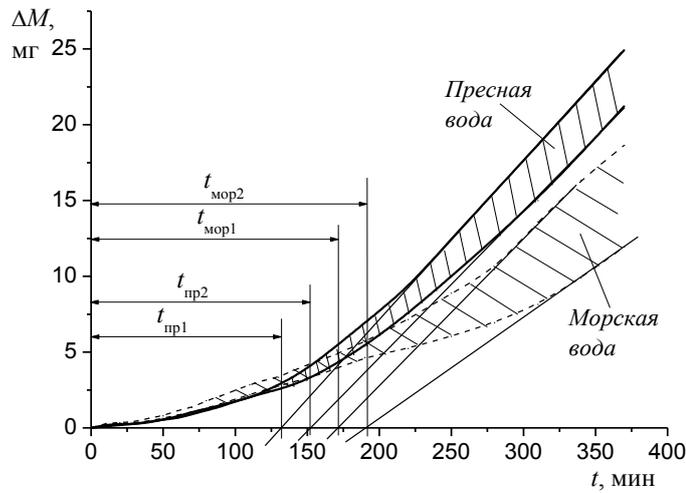


Рис. 3. Зависимость потерь массы образцов из латуни ЛЦ40МцЗЖ от продолжительности кавитационного воздействия при испытании в морской и пресной воде

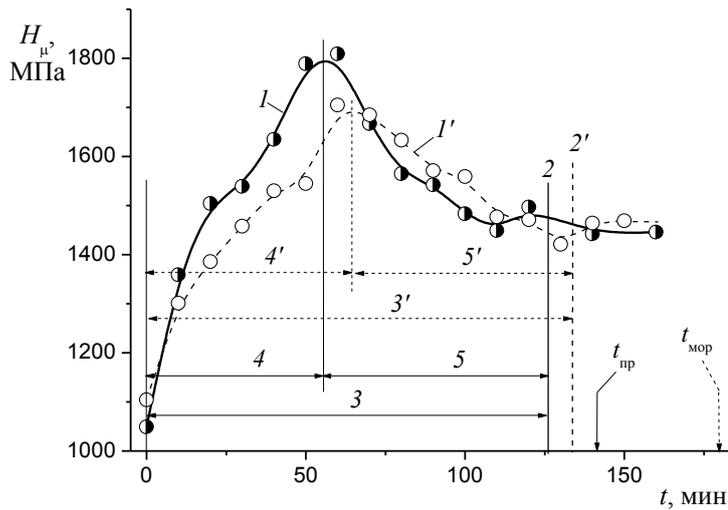


Рис. 4. Кинетика упрочнения латуни ЛЦ40МцЗЖ при кавитационном изнашивании в пресной (1) и искусственной морской (1') воде: 2 и 2' – окончание инкубационного периода в пресной и морской воде соответственно; 3 и 3' – продолжительность инкубационного периода, определённая методом микротвёрдости, в пресной и морской воде соответственно; 4 и 4' – продолжительность стадии упрочнения в пресной и морской воде соответственно; 5 и 5' – продолжительность стадии разупрочнения в пресной и морской воде соответственно

Из сравнения графиков  $H_{\mu}(t)$  видно, что упрочнение поверхностных слоёв в морской воде заметно меньше, чем в пресной, при этом максимум микротвёрдости при изнашивании в морской воде достигается при кавитационном воздействии в морской воде позже, чем в пресной.

Интересно было сравнить продолжительность инкубационного периода, так как в течение него происходит накопление пластических деформаций в поверхностном

слое до начала отделения частиц износа, и его продолжительность характеризует скорость увеличения плотности дислокаций в поверхностном слое при кавитационном воздействии. Так как из-за естественного разброса точек точное определение инкубационного периода по окончании стадии разупрочнения в нашем случае оказалось невозможным (положение линий 2 и 2' указано примерно), то инкубационный период оценили традиционным способом, т. е. по пересечению касательных к кинетическим кривым изнашивания  $\Delta M(t)$  с осью абсцисс [16]. Для случая испытаний в пресной воде инкубационный период  $t_{пр}$  оценивали следующим образом:

$$t_{пр} = \frac{t_{пр1} + t_{пр2}}{2},$$

где  $t_{пр1}$  и  $t_{пр2}$  – продолжительности инкубационного периода, полученные при испытании в пресной воде первого и второго образца соответственно (рис. 3).

Аналогично оценивали и продолжительность инкубационного периода  $t_{мор}$  и для случая испытаний в искусственно морской воде:

$$t_{мор} = \frac{t_{мор1} + t_{мор2}}{2},$$

где  $t_{мор1}$  и  $t_{мор2}$  – продолжительности инкубационного периода, полученные при испытании в искусственной морской воде первого и второго образца соответственно (рис. 3).

Найденные значения  $t_{пр}$  и  $t_{мор}$  для наглядности указали стрелками на рис. 4. Видно, что в морской воде инкубационный период получился более продолжительным примерно на 25 %.

Выраженный хемомеханический эффект при испытании в морской воде на ультразвуковом МСВ, проявляющийся в меньшем упрочнении латуни, большей продолжительности времени до достижения максимальной степени упрочнения и большей продолжительности инкубационного периода, чем в пресной воде, можно объяснить совместным действием на поверхность ударных волн с ультразвуковой частотой и коррозионного фактора. Поверхность является естественным барьером для выхода дислокаций, а совместное действие ультразвука и морской воды снижает этот барьер. Известно, например, что при поверхностном пластическом деформировании при ударах незакреплёнными шариками с ультразвуковой частотой увеличивается подвижность дислокаций и степень насыщения дислокациями поверхностного слоя [23]. Снижение плотности дислокаций в поверхностном слое может происходить вследствие стравливания поверхностного слоя, насыщенного дислокациями при коррозии, или за счёт снижения напряжения в голове плоских скоплений дислокаций из-за образования двойного электрического слоя на поверхности и, как следствие, снижения его поверхностной энергии. Это ведёт не только к уменьшению скорости увеличения плотности дислокаций в поверхностном слое, но и к уменьшению насыщенности поверхностного слоя микрообъёмами с критической плотностью дислокаций, в которых начинается зарождение трещин, а, следовательно, и уменьшению кавитационного износа в морской воде по сравнению с пресной.

#### 4. Выводы

При испытании на износостойкость в морской воде на ультразвуковом МСВ в условиях высокой интенсивности кавитационного воздействия происходит снижение износа по сравнению с опытами в пресной воде при той же интенсивности кавитации.

Указанный факт объясняется хемомеханическим эффектом, проявляющимся при

совместном действии на поверхность металла электрохимической коррозии, ударных волн при коллективном схлопывании с ультразвуковой частотой кавитационных пузырьков и малой толщине пластически деформированного слоя металлической поверхности.

Обнаруженное явление следует принимать во внимание при проведении экспериментов по определению сравнительной кавитационной износостойкости сплавов в морской воде.

#### Список литературы:

1. Ponkratov, D. DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller / D. Ponkratov // 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015). – Journal of Physics: Conference Series 656 (2015). – P. 1–4 [https://doi: 10.1088/1742-6596/656/1/012055](https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012055).
2. Фомин В.В. Гидроэрозия металлов. – М.: Машиностроение, 1977. – 287 с.
3. Цветков Ю.Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 155 с.
4. Möller H., Boshoff E. T., Froneman H. The corrosion behavior of a low carbon steel in natural and synthetic seawaters // The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2006. – Vol. 106. – P. 585–592.
5. Elbeik S., Tseung A.C.C., Mackay A.L. The formation of calcareous deposits during the corrosion of mild steel in seawater // Corrosion Science. – 1986. – Vol. 26. – P. 669–680.
6. Osman M. M., Corrosion inhibition of aluminium-brass in 3,5 % NaCl solution and seawater // Materials Chemistry and Physics. – 2001. – Vol. 71. – P. 12–16.
7. Basumatary J., Nie M., Wood R. J. K. The synergistic Effects of Cavitation Erosion-Corrosion in Ship Propeller Materials // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. – 2015. – №12. – P. 1–12 <https://doi.org/10.1007/s40735-015-0012-1>.
8. Тимербулатов М.Г. Усовершенствование методики и определение кавитационной стойкости металлов применительно к гидротурбинам // Заводская лаборатория. – 1968. – №12. – С.1508–1511.
9. Waring S., Preiser H.S., Thiruvengadam A. On the role of corrosion in cavitation damage// Journal of Ship Research. – 1965. – V.9. – p. 200–208.
10. Пылаев Н. И., Эдель Ю.У. Кавитация в гидротурбинах – Л.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
11. Белый В.И., Некоз А.И. Исследование кавитационно-эрозионного изнашивания металлов в химически-активных средах// Проблемы трения и изнашивания – Киев: Тэхника, 1981. – вып.19. – С.76–79.
12. Волин В.Э., Гринберг А.Я. Влияние электрохимической коррозии на скорость кавитационной эрозии материалов// Тр. ВНИИ-Гидромаш, М.: Энергия, 1975. – вып.46. – С.44-53.
13. Некоз А.И., Стечишин М.С., Сологуб Н.А., Белый В.И. Определение износостойкости материалов при кавитационно-эрозионном изнашивании// Проблемы трения и изнашивания. – 1983. – вып.24. – С. 97–103.
14. Basumatary J., Wood R. J. K. The synergistic Effects of Cavitation Erosion and Corrosion for Nickel aluminium bronze with oxide film in 3,5 % NaCl solution // Wear. – 2017. – Vol. 376–377. – P. 1286–1297. [https://doi: 10.1016/j.wear.2017.01.047](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.047).
15. Sreedhar B.K., Albert S.K., Pandit A.B. Cavitation damage: Theory and measurements – A review // Wear. – 2017. – V. 372–373. – P. 177–196 <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.009>.
16. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. – ASTM International, 2010. – 19 p.
17. Гликман Л.А. Коррозионно-механическая прочность металлов. – М.-Л.: Машгиз, 1955. –175 с.
18. ASTM D1141-98. Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. West Conshohocken, PA, ASTM International, 1999. – 3 p.
19. Cavanaugh G.M. Formulae and Methods VI. Woods Hole, MA, The Marine Biological, 1975. – 84 p.
20. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1981. – 271 с.
21. Terauchi Y., Matuura H., Kitamura M. Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements // Bulletin of the JSME. – 1973. – V. 16. – No. 102. – P. 1829–1838.
22. Krause H., Matheus M. Investigation of cavitation erosion using X-ray residual stress analysis // Wear. – 1987. – Vol. 119. – No. 3. – P. 343–352.
23. Кулёмин А.В., Кононов А.В., Стебельков И.А. Повышение усталостной прочности деталей путём ультразвуковой поверхностной обработки // Проблемы прочности. – 1981. – №1. – С. 70–74.

## INFLUENCE OF THE CORROSION FACTOR ON THE CAVITATION WEAR RESISTANCE OF ALLOYS FOR SHIP PROPELLERS

**Yuriy N. Tsvetkov,**

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

**Evgeniy O. Gorbachenko,**

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

**Roman N. Larin,**

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

*Abstract. The cavitation wear resistance of 08H14NDL stainless steel, BrA8Mts11Zh3N2L bronze and LTs40Mts3Zh brass was studied in fresh water and artificial sea water of different compositions. The tests were carried out on a magnetostrictive vibrator with a hub oscillation frequency of about 22 kHz; the amplitude of vibrations of its end could be varied from 12 to 27  $\mu\text{m}$ , the distance between the end of the concentrator and the surface of the samples was 0.5 mm. It was shown, that the increase in the amplitude of vibration leads to the decrease in the difference between the cavitation wear in fresh water and the sea water. It was demonstrated that under the cavitation attack of high intensity the brass wear in the sea water can be essentially lower than the one obtained in the fresh water.*

*The indicated paradox is explained, apparently, by the features of tests on ultrasonic magnetostrictive vibrators in combination with the plasticizing effect of an aggressive fluid. The ultrasonic frequency impact on the shock waves surface increases the mobility of dislocations, and the etching of surface layers in sea water facilitates their discharge on the surface: a chemomechanical effect takes place.*

*Keywords: cavitation wear, metallic alloy, ship propeller, ultrasonic magnetostriction vibrator, sea water, fresh water, microhardness, chemomechanical effect.*

### References:

1. Ponkratov D. «DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller» 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015). Journal of Physics: Conference Series 656 (2015): 1–4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012055>.
2. Fomin V.V. *Gidroeroziya metallov*. – M.: Mashinostroeniye, 1977. 287 p.
3. Tsvetkov Y.N. *Kavitatsionnoye iznashivaniye metallov i oborudovaniya*. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. 155 p.
4. Möller H., Boshoff E.T., Froneman H. «The corrosion behavior of a low carbon steel in natural and synthetic seawaters» *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 106 (2006): 585–592.
5. Elbeik S., Tseung A.C.C., Mackay A.L. «The formation of calcareous deposits during the corrosion of mild steel in seawater» *Corrosion Science* 26 (1986): 669–680.
6. Osman M.M. «Corrosion inhibition of aluminium-brass in 3,5 % NaCl solution and seawater» *Materials Chemistry and Physics* 71(2001) 12–16.
7. Basumatary J., Nie M., Wood R. J.K. «The synergistic Effects of Cavitation Erosion-Corrosion in Ship Propeller Materials» *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion* 12 (2015): 1–12 <https://doi.org/10.1007/s40735-015-0012-1>
8. Timerbulatov M.G. «Usovershenstvovaniye metodiki i opredeleniye kavitatsionnoy stoykosti metallov primenitelno k gidroturbinam» (Improved technique to determine the cavitation erosion resistance of metal alloys as applied to hydroturbines) *Zavodskaya laboratoriya* 12 (1968): 1508–1511.
9. Waring S., Preiser H.S., Thiruvengadam A. «On the role of corrosion in cavitation damage» *Journal of Ship Research* 9 (1965): 200–208.
10. Pilayev N.I., Edel Yu.U. *Kavitatsiya v gidroturbinah*. – L.: Mashinostroyeniye, 1974. 256 p.
11. Belyy V.I., Nekoz A.I. «Issledovaniye kavitatsionno-erozionnogo iznashivaniya metallov v himicheskii-aktivnykh sredakh» (Investigation of the cavitation wear of metals in chemically active envi-

- ronments) Problemi treniya i iznashivaniya. 19 (1981): 76–79.
12. Volin V.E., Grinberg A.Ya. «Vliyaniye elektrohimicheskoy korrozii na skorost kavitatsionnoy erozii materialov» (Influence of electrochemical corrosion on the cavitation wear rate of metals) Trudi VNI-Gidromash 46 (1975): 44–53.
13. Nekoz A.I., Stechishin M.S., Sologub N.A., Beliy V.I. «Opredeleniye iznosostoykosti materialov pri kavitatsionno-erozionnom iznashivanii» (Evaluation of materials resistance against cavitation wear) Problemi treniya i iznashivaniya 24 (1983): 97–103.
14. Basumatary J., Wood R.J.K. «The synergistic Effects of Cavitation Erosion and Corrosion for Nickel aluminium bronze with oxide film in 3,5 % NaCl solution» Wear 376–377 (2017): 1286–1297 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.047>.
15. Sreedhar B.K., Albert S.K., Pandit A. B. «Cavitation damage: Theory and measurements – A review» Wear 372–373 (2017): 177–196 <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.009>.
16. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. – ASTM International, 2010. 19 p.
17. Glikman L.A. Korroziionno-mehanicheskaya prochnost metallov. – M.-L.: Mashgiz, 1955. 175 p.
18. ASTM D1141-98. Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. West Conshohocken, PA, ASTM International, 1999. 3 p.
19. Cavanaugh G.M. Formulae and Methods VI. Woods Hole, MA, The Marine Biological, 1975. 84 p.
20. Gutman E.M. Mehanohimiya metallov i zashita ot korrozii. – M.: Metallurgiya, 1981. 271 p.
21. Terauchi Y., Matuura H., Kitamura M. «Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements» Bulletin of the JSME 16.102 (1973): 1829–1838.
22. Krause H., Matheus M. «Investigation of cavitation erosion using X-ray residual stress analysis» Wear 119.3 (1987): 343–352.
23. Kulemin A.V., Kononov A.V., Stebelkov I.A. «Povisheniye ustalostnoi prochnosti detaley putem ultrazvukovoy poverhnostnoy obrabotki» (Increasing the fatigue resistance of parts by means of ultrasonic treatment of their surface) Problemi prochnosti 1 (1981): 70–74.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Юрий Николаевич Цветков**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии судоремонта, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»), 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7; e-mail: [yuritsvet@mail.ru](mailto:yuritsvet@mail.ru)

**Евгений Олегович Горбаченко**, ассистент кафедры технологии судоремонта, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»), 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7; e-mail: [jenyraqwerty@gmail.com](mailto:jenyraqwerty@gmail.com)

**Ларин Роман Николаевич**, к.т.н., доцент кафедры технологии судоремонта, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»), 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7; e-mail: [npo.albatros@gmail.com](mailto:npo.albatros@gmail.com)

**Tsvetkov Yuriy Nikolaevich** – Doctor of Technical Sciences; Professor; Head of the Shiprepairing Subdepartment; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 5/7 Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

**Gorbachenko Evgeniy Olegovich** – Post-graduate; Shiprepairing Subdepartment; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 5/7 Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

**Larin Roman Nikolaevich** – Associate Professor; PhD in Engineering Science; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 5/7 Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 24.10.2019 г.

## **Раздел III**

**Экономика, логистика, управление  
на транспорте**



## **Section III**

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



УДК 656.6

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.41>

## **УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОНЦЕПЦИЙ**

**Ж.К. Кегенбеков**

*Казахстанско-Немецкий университет, г. Алматы, Казахстан*

**И.В. Джаксон**

*Институт транспорта и связи, г. Рига, Латвия*

*Аннотация: В статье рассмотрены основные концепции управления бизнес-процессами предприятия, преимущество и недостатки толкающей системы. Также в статье предложен вариант модификации концепции Just-in-time (JIT), названная нами VM (variability in manufacturing), концепцией вариативного производства. Основная идея концепции VM заключается в возможности комбинирования тянущей и толкающей систем. Основное преимущество данной консолидации логистических систем – возможность варьирования производственных мощностей на отдельных сегментах системы. Данная модель может быть использована при производстве продукции с различной динамикой спроса на ее составные части.*

*Ключевые слова: логистика, логистические системы, цепь поставок, материальные и информационные потоки*

### **Введение**

Планирование, основанное на комбинировании и совмещении логистических концепций, позволяет рассмотреть жизненный цикл товара от добычи сырья до конечного потребителя. Комбинирование и сочетание методов организации грузооборота позволяет достичь более рационального использования ресурсов предприятия.

Прежде всего, хотелось бы дать дефиницию логистики, на понимании которой строится наша работа. Логистика – это комплексная наука, основополагающей задачей которой является: организация менеджеров различных подразделений с целью оптимизации товарно-денежных потоков и информации, построения цепи поставок и обеспечения максимально рационального взаимодействия между всеми звеньями данной цепи.

В зависимости от поставленной задачи и научно-методологического аппарата логистическая концепция используются на определенных участках цепи поставок (добыча, складирование, производство, распределение, сбыт и т.д.)

В соответствии с поставленными задачами, методами их достижения и располагаемыми ресурсами, предприятие использует ту или иную логистическую концепцию [1,2].

Управление ресурсами предприятия на основе логистических концепций изучали как отечественные, так и зарубежные ученые. К примеру, Павлов Д.А., Ефанова Н.В. в работе «Минимизация затрат ресурсов при распределении производственных задач предприятия с учетом структуры предприятия» исследовали методику минимизации затрат при распределении производственных задач с учетом структурных особенностей технологических процессов предприятия. В работе строится многокритериальная дискретная оптимизационная модель распределения производственных задач по структуре производственных элементов. Предложена одна из методик, основанная на предлагаемой модели, позволяющая выделять группы, состоящие из четырех элементов в производственной структуре предприятия. Модель построена с помощью сетевой конструкции – предфрактальных графов [3]. Исмаилова Ш.Т., Атуева Э.Б., Булатова З.К. в своих научных исследованиях рассматривали применение логистического

подхода в управлении материальными потоками [4]. Бондарева М.А., Федоров А.В. в своих научных исследованиях изучали проблемы, с которыми сталкиваются предприятия на этапе сбыта готовой продукции. Авторами проведен специальный анализ производственных материальных потоков, связанных с международной деятельностью предприятия [5]. Также по вопросам управления предприятием на основе логистических концепций можно рассмотреть исследование Пител Н., Алешкина Л., Вернюк Н., Новак И. и Смолий Л., где обосновывается, что в условиях международного бизнеса управление логистической системой внутри предприятия требует комплексного подхода и координации потенциальных возможностей хозяйствующего субъекта, четкого баланса и взаимосвязи логистических потоков в сфере производства, закупок, складирования, транспортировки и маркетинга. Научная новизна проведенного исследования заключается в обосновании целесообразности создания стратегии управления логистическими процессами внутри предприятия-субъекта внешнеэкономической деятельности, основанной на его внешнеэкономической ориентации. Такая логистическая система будет способствовать формированию экономического потенциала внутри предприятия и, соответственно, повышению рентабельности капитала. Кроме того, она станет источником его конкурентных преимуществ и средством повышения рыночной стоимости и прибыльности [6]. A Sokolovskyi, S., Naumenko, M. в своих исследованиях рассмотрели вопрос совершенствования логистической системы предприятия: моделирование сценариев и оценка эффективности. Цель работы – выразить комплекс моделей оценки, анализа эффективности логистической деятельности производственно-экономических систем, фиксирующих всю совокупность финансово-экономических, производственных процессов, существующих подсистем и преемственность логистической системы предприятия, разработать и обосновать пути совершенствования существующей логистической системы. Для моделирования сценариев и оценки эффективности работы логистического отдела была построена когнитивная модель системы управления предприятием. Параметрами модели (концепции) являются: загрузка канала в единицу времени (месяц); количество каналов обслуживания; квалификация персонала; время простоя каналов обслуживания; время обслуживания клиентов; прибыль; качество обслуживания клиентов. Результатом внедрения является приемлемый сценарий развития, который представляет собой позитивные изменения в логистической деятельности предприятия. Реализация данного сценария также предполагает специальное применение системы управления взаимоотношениями с клиентами (CRM) (прикладное программное обеспечение для организаций) [7].

### **Толкающая система**

Классическим методом организации грузооборота является построение «толкающей» логистической системы.

Толкающая система (рис. 1) – организация движения материального потока, при которой ресурсы подаются с предыдущей операции на последующую в соответствии с заранее сформированным графиком. Информационный обмен в данном случае осуществляется параллельно, то есть одновременно на всех звеньях цепи поставок. Основными сложностями данного метода являются: необходимость высокоточного планирования, синхронизации всех звеньев цепи поставок и широкое использование информационных технологий. В случае успеха наша цепь поставок превращается в высокоточный, непрерывно работающий, механизм, напоминающий конвейер. Как результат – увеличение объема производства (за счет непрерывности цикла).



Рис. 1. Схема толкающей системы

Для данной системы организации наиболее распространенной является концепция MRP (material Requirement Planning), направленная на удовлетворение потребностей предприятия в ресурсах, сопровождающаяся минимальными транспортными и складскими издержками.

Bogataj D. и Bogataj M. в своих научных исследованиях на тему «NPV approach to material requirements planning theory – a 50-year review of these research achievements» представили развитие этой теории с 1967 года, когда Груббстром опубликовал свою первую экономическую статью о преобразованиях Лапласа в производстве и инвестициях. Теория планирования материальных потребностей (MRP) отмечает 50-летие своего развития. Поскольку задержки неизбежны, Груббстром разработал теорию, в которой задержки вычисляются в пространстве комплексных переменных. Использование его подхода для оценки времени и подверженности риску в сложных производственно-складских системах гораздо проще при работе с многочисленными задержками. Работая в пространстве комплексных переменных, описывающих производственные потоки и денежные потоки, связанные с предметами, проще вывести NPV (Net Present Value) видов деятельности в системе. Такой подход позволяет лучше оценить воздействие на подверженность риску и перепланировку [8].

Функционирование логистической системы в рамках данной концепции позволяет достичь наибольшего объема производства. Важно отметить наличие дополнительных складских издержек и относительную ригидность данной системы, выраженную в невозможности подстроиться под быстроменяющийся рынок.

Стремление к сокращению издержек и повышению гибкости привело к эволюции логистических систем и появлению альтернативных концепций.

### Тянущая система

Основной концепции JIT (Just-in-time) является тянущая система организации грузооборота.

Важно отметить концепцию JIT, охватывающую все звенья транспортной цепи и задающую, в качестве приоритетных задач: сроки доставки, качество конечного продукта, минимизацию складских издержек. Соответственно, логистический коридор или цепь поставок будут строиться для достижения максимальной скорости и непрерывности грузопотока при наименьших запасах и издержках.

Тянущая система – организация движения материального потока, при которой ресурсы подаются с предыдущей операции на последующую в соответствии с потребностями. основополагающим фактором является объем спроса на конечный продукт (рис. 2).

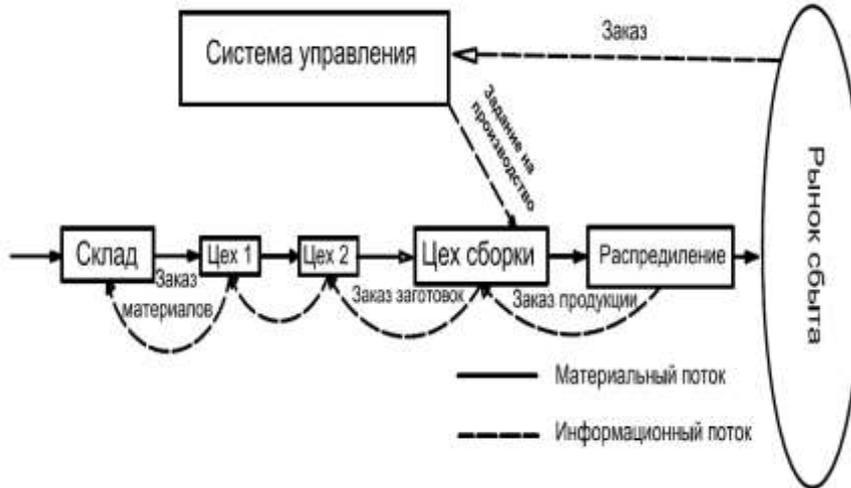


Рис. 2. Схема тянущей системы

Информационные потоки при тянущей системе организации грузооборота передаются последовательно, то есть от системы управления к цеху сборки (звено конечного производства), от цеха сборки к цеху производства деталей и т.д.

Основными преимуществами данной системы, в сочетании с концепцией JIT, является гибкость и производство в соответствии с потребностями рынка.

К минусам можно отнести: отсутствие непрерывного цикла производства, неполноценное использование производственных мощностей.

Важно отметить, что при использовании системы JIT закупка или добыча сырья производится строго в соответствии с потребностью в конечном продукте. Таким образом, в отличие от традиционного подхода к производству, структурное подразделение не имеет жесткого графика работы, а оптимизирует работу в пределах потребностей (заказа). Соответственно, в идеале функционирование логистической системы не требует создания запасов. Из этого следует, что нормальное функционирование подобных систем возможно лишь при условиях идеальной «пунктуальности» поставщиков и стабильном рынке [11].

Однако, наш мир не идеален, поставщики не абсолютно «пунктуальны», а рынок представляет хаотичную структуру, соответственно, малейшие непредвиденные обстоятельства, в условиях отсутствия запасов, повлекут за собой остановку производства или невозможность сбыта, что неприемлемо для предприятия. Вышеизложенный факт делает необходимым модификацию, корректировку и адаптацию метода под нужды предприятия. Одной из основных модификаций метода является его видоизменение и совмещение с другими логистическими концепциями. Управление цепями поставок дает широкие возможности в модификации и комбинировании методов.

Многие ученые уже решают эти вопросы. К примеру, ученые Ani, MNC, Kamaruddin S.; Azid, IA в 4-ой Международной конференции по управлению, автоматизации и робототехнике (ICCAR) представили результаты своих исследований по улучшению бизнес-процессов на производственном предприятии путем сосредоточения внимания на эффективном размере Канбана для достижения производственной системы (just-in-time). Результаты реализации были идентифицированы, проанализиро-

ваны и проверены с использованием эффективных фидеров размера Канбан посредством анализа системы массового обслуживания. Конечная цель состояла в том, чтобы обеспечить адаптацию разработанного подхода Канбана. В результате было выявлено и успешно сведено к минимуму время ожидания производственного процесса во времени производственных потерь из-за предварительной подготовки детали [9].

### Концепция вариативного производства (VM)

Ниже представлена оригинальная модификация концепции JIT, названная нами VM (variability in manufacturing) – концепция вариативного производства.

В основе данной модификации лежит синтез расширенной системы JIT с тянущей системой организации грузооборота и концепции MRP.

Основная идея концепции VM заключается в возможности комбинирования тянущей и толкающей системы. Главная проблема при реализации данной идеи – несовместимость систем. Тянущая система организации подразумевает: гибкость, управление логистической системой посредством заказа на готовую продукцию (последовательное управление), короткие сроки выполнения заказов, тогда как толкающая система относительно ригидна, использует параллельную систему управления и долгосрочное планирование.

Однако теоретически одна система организации цепей поставок может включать в себя другую в небольшом масштабе (производственная логистика) и при единой системе управления. Данная консолидация логистических систем может быть представлена следующей схемой (Рис. 3):

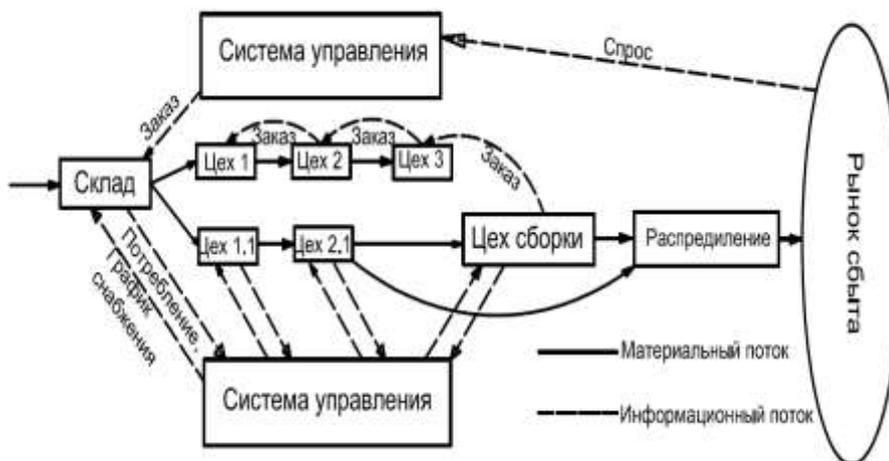


Рис. 3. Схема консолидации логистических систем

Основное преимущество данной консолидации логистических систем – возможность варьирования производственных мощностей на отдельных сегментах системы. Данная модель может быть использована при производстве продукции с различной динамикой спроса на ее составные части. Упрощенным примером такого производства может являться изготовление спортивных снарядов (гантели, штанга). Составными частями в данном случае будут «гриф» и «блины». При консолидации логистических систем составная часть, имеющая больший спрос (блины), по умолчанию производится в пределах толкающей подсистемы (Цеха 1.1 и 2.1 на рис. 3), тогда как составная часть, имеющая меньший спрос или не имеющая спроса в несобранном состоянии, производится в пределах тянущей подсистемы.

Ключевым в данной системе является момент отправки части составных частей с большим спросом (Цех 2.1) в цех сборки, где происходит комплектация и сборка готовой продукции, оставшаяся часть попадает в звено распределения с последующей поставкой на рынок.

Сущностью концепции VM является организация и управление цепью поставок на основе смешанной организации грузооборота. Ключевым моментом в управлении данной системой является возможность оперативного изменения производственных мощностей предприятия посредством инструмента, названного нами – «Рычаг вариативности». Рычагом вариативности являются звенья цепи поставок, организованные по принципу толкающей системы. В зависимости от рыночной конъюнктуры предприятие может варьировать производственные мощности, сохраняя гибкость логистической системы.

Проблемы управления запасами возникают в различных отраслях промышленности, и каждый отдельный реальный запас изобилует нестандартными факторами и тонкостями. Практические стохастические задачи управления запасами часто являются аналитически неразрешимыми из-за своей сложности. В связи с этим моделирование-оптимизация становится все более популярным инструментом для решения сложных бизнес-задач. К сожалению, моделирование, особенно детальное, требует много времени и памяти. В свете этого факта, возможно, более разумно использовать альтернативную более дешевую для вычисления метамодель, которая специально разработана для того, чтобы приблизить исходное моделирование [10]. Так же ученые со всего мира занимаются вопросами имитационного моделирования логистических систем. Здесь можно отметить исследование Azougagh, Y; Benhida, K; Elfezazi, S [12], Müller, M., Reggelin, T., Schmidt, S., Weigert, D [13], Tolujevs, J., Shedenov, O., Askarov, G. [14], Lang, S., Dastagir Kota, M.S.S., Weigert, D., Behrendt, F. [15].

#### **Выводы:**

Концепция VM может дать расширенный спектр возможностей при производстве продукции с различной динамикой спроса на составные части и при необходимости варьирования производственных мощностей. Однако успех данного метода организации возможен лишь при условии развитой системы управления и информационной логистики.

Организация ресурсов предприятия на основе логистических принципов имеет огромный потенциал, а ее основополагающей частью является разработка и адаптация логистических концепций.

Важно отметить, что изложенная нами модификация не позиционирует себя как единственно правильная и позволяющая достичь максимально рационального результата, а лишь демонстрирует возможности модификации и комбинирования логистических концепций в соответствии с потребностями предприятия.

#### **Список литературы:**

1. Бауэрсокс Д., Клосс Д. «Логистика: интегрированная цепь поставок» 2-е издание ЗАО «Олимп-Бизнес», 2010.
2. «Модели и методы теории логистики» 2-е издание под редакцией Луганского ООО «Питер Пресс», 2007.
3. Павлов Д.А., Ефанова Н.В. Минимизация затрат ресурсов при распределении производственных задач предприятия с учетом структуры предприятия// Научный журнал КубГАУ, №154(10), 2019. – 30 стр.
4. Исмаилова Ш.Т., Атуева Э.Б., Булатова З.К. Совершенствование управление материальными потоками на предприятиях газовой промышленности на основе логистического подхода//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №23, 2011\_4

5. Бондарева М.А., Федоров А.В. Анализ производственных материальных потоков, связанных с международной деятельностью предприятия//Вестник СГТУ №4(28), 2007. – 175–178 стр.
6. Pitel N., Alioshkina L., Verniuk N., Novak I., Smolij L. Managing Logistic System of an Enterprise in the Context of Conducting International Business Transactions//TEM Journal-Technology Education Management Informatics, Volume: 8, Issue: 3, 2019. – Pages: 888–893
7. Sokolovskyi, S., Naumenko, M. Improving the enterprise's logistic system: scenarios modeling and evaluation of efficiency//Financial And Credit Activity-Problems Of Theory And Practice, Volume: 2, Issue: 25, 2018. – Pages: 236-245
8. Bogataj, D, Bogataj, M NPV approach to material requirements planning theory – a 50-year review of these research achievements// International Journal Of Production Research, Volume: 57, Issue: 15-16, 2019.- Page: 5137-5153, Special issue: SI
9. Ani, MNC; Kamaruddin, S; Azid, IA Analysis of the Effective Production Kanban Size with Triggering System for Achieving Just-In-Time (JIT) Production// 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Auckland, New Zealand, 2018. – Page: 316–320
10. Ilya Jackson, Jurijs Tolujevs, Sebastian Lang, Zhandos Kegenbekov Metamodelling of Inventory-Control Simulations Based on a Multilayer Perceptron, Scientific Journal «Transport and Telecommunication», in Issue No 20(3), 2019
11. Мордовченков Н.В., Сироткин А.А. Современные теоретические и практические направления инновационной деятельности в транспортно-логистической сфере. – «Вестник ВГАВТ» №55, 2018. – 148 стр
12. Azougagh, Y; Benhida, K; Elfezazi, S Contribution to the modelling and analysis of logistics system performance by Petri nets and simulation models: Application in a supply chain // 2ND International Manufacturing Engineering Conference And 3rd Asia-Pacific Conference On Manufacturing Systems (IMEC-APCOMS 2015), Volume: 114, Article number: 012065
13. Müller, M., Reggelin, T., Schmidt, S., Weigert, D. Simulation-based planning and dimensioning of an automatic laundry storage and retrieval unit with dynamic storage location sizes (2019) Proceedings – Winter Simulation Conference, 2018-December, article № 8632315, pp. 2977-2988.
14. Tolujevs, J., Shedenov, O., Askarov, G. Investigation of road transport enterprise functioning on the basis of system dynamics// (2018) Transport and Telecommunication, 19 (1), pp. 1-9.
15. Lang, S., Dastagir Kota, M.S.S., Weigert, D., Behrendt, F. Mixed reality in production and logistics: Discussing the application potentials of Microsoft HoloLensTM// (2019) Procedia Computer Science, 149, pp. 118–129

## **ENTERPRISE RESOURCE MANAGEMENT BASED ON LOGISTICS CONCEPTS**

**Zhandos K. Kegenbekov,**

*Kazakh-German University, Almaty, Republic of Kazakhstan*

**Ilya V. Jackson,**

*Institute of transport and communications, Riga, Latvia*

*Abstract. The article deals with the basic concepts of business process management enterprise, the advantages and disadvantages of the pushing system, aimed at meeting the needs of the enterprise in resources, accompanied by minimal transport and storage costs and pulling system material flow organization, in which resources are fed from the previous operation to the next, in accordance with the needs. The article also offers the concept modification variant of Just in time (JIT), which we call VM (variability in manufacturing), the variable production concept. The main idea of the VM concept is to be able to combine a pulling and pushing system. The main advantage of this logistics systems consolidation is the ability to vary production capacity in individual segments of the system. This model can be used in the production of goods with different demand dynamics for its components.*

*Keywords: logistics, logistics systems, material and information flows*

### **References:**

1. D. Bowersox, D. Closs «logistical management: the integrated supply chain» 2nd edition, ZAO «Olimp-Biznes», 2010.

2. «Models and methods of logistics theory» 2nd edition edited by Lugansk LLC «Peter Press», 2007.
3. Pavlov D.A, Efanova N.V. Minimization of resource costs in the distribution of production tasks of the enterprise taking into account the structure of the enterprise// Scientific journal of Kubgau, no. 154(10), 2019. – 30 pages.
4. Ismailova sh. T., Atueva E.B., Bulatova Z.K. Improvement of material flows management at gas industry enterprises on the basis of logistic approach//Bulletin of Dagestan state technical University. Technical science. No. 23, 2011. 4
5. Bondareva M.A., Fedorov A.V. Analysis of production material flows associated with international activities of the enterprise // Vestnik SGTU №4 (28), 2007. – 175–178 pages. [6] Mordovchenkov N. V., Sirotkin A.A. Modern theoretical and practical directions of innovative activity in the transport and logistics sphere//«Vestnik VGAVT» No. 55, 2018. – 148 pages
6. Nina,; Liudmyla, A; Natalia, V; Inna, N; Lydmila, S Managing Logistic System of an Enterprise in the Context of Conducting International Business Transactions//TEM Journal-Technology Education Management Informatics, Volume: 8, Issue: 3, 2019. – Pages: 888–893
7. Sokolovskiy, S, Naumenko, M Improving the enterprise's logistic system: scenarios modeling and evaluation of efficiency// Financial And Credit Activity-Problems Of Theory And Practice, Volume: 2, Issue: 25, 2018. – Pages: 236–245
8. Bogataj, D, Bogataj, M NPV approach to material requirements planning theory – a 50-year review of these research achievements// International Journal Of Production Research, Volume: 57, Issue: 15–16, 2019.- Page: 5137-5153, Special issue: SI
9. Ani, MNC; Kamaruddin, S; Azid, IA Analysis of the Effective Production Kanban Size with Triggering System for Achieving Just-In-Time (JIT) Production// 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Auckland, New Zealand, 2018. – Page:316-320
10. Ilya Jackson, Jurij Tolujevs, Sebastian Lang, Zhandos Kegenbekov Metamodelling of Inventory-Control Simulations Based on a Multilayer Perceptron, Scientific Journal «Transport and Telecommunication», in Issue No 20(3), 2019
11. Mordovchenkov N. V., Sirotkin A. A. Modern theoretical and practical directions of innovative activity in the transport and logistics sphere. – «Vestnik VGAVT» No. 55, 2018. – 148 pages
12. Azougagh, Y; Benhida, K; Elfezazi, S Contribution to the modelling and analysis of logistics system performance by Petri nets and simulation models: Application in a supply chain // 2ND International Manufacturing Engineering Conference And 3rd Asia-Pacific Conference On Manufacturing Systems (IMEC-APCOMS 2015), Volume: 114, Article number: 012065
13. Müller, M., Reggelin, T., Schmidt, S., Weigert, D. Simulation-based planning and dimensioning of an automatic laundry storage and retrieval unit with dynamic storage location sizes (2019) Proceedings – Winter Simulation Conference, 2018-December, article № 8632315, pp. 2977-2988.
14. Tolujevs, J., Shedenov, O., Askarov, G. Investigation of road transport enterprise functioning on the basis of system dynamics// (2018) Transport and Telecommunication, 19 (1), pp. 1-9.
15. Lang, S., Dastagir Kota, M.S.S., Weigert, D., Behrendt, F. Mixed reality in production and logistics: Discussing the application potentials of Microsoft HoloLensTM// (2019) Procedia Computer Science, 149, pp. 118-129

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

**Жандос Кадырханович Кегенбеков**, к.т.н.,  
доцент, декан факультета инженерно-экономических наук, Казахстанско-Немецкий университет,  
050016, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Пушкина, 111  
e-mail: kegenbekov@dku.kz

**Илья Владимирович Джаксон**, докторант Института транспорта и связи,  
LV-1019, Латвия, г. Рига, ул. Ломоносова, 1  
e-mail: ij1993@mail.ru

**Zhandos K. Kegenbekov**, candidate of technical Sciences, associate Professor, Dean of the faculty of engineering and economic Sciences, Kazakh-German University,  
111, Pushkin st., Almaty, 050016, Republic of Kazakhstan

**Ilya V. Jackson**, PhD student At the Institute of transport and communications,  
1, Lomonosov st., Riga, Latvia, LV-1019

Статья поступила в редакцию 10.01.2020 г.

УДК 338.001.36

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.42>

**ИТОГИ DOING BUSINESS'2020:  
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ЭКОНОМИКО-ПРАВОВОГО ИНСТИТУТА  
НЕСОСТОЯТЕЛЬНОСТИ (БАНКРОТСТВА)**

**Ю.Ю. Королев**

*Институт бизнеса Белорусского государственного университета*

*г. Минск, Беларусь*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7178-7563>

*Аннотация. В статье проанализированы итоги международного рейтинга «Ведение бизнеса» на 2020 год для Республики Беларусь и Российской Федерации. На фактических данных рейтинга по двум странам исследована методика показателя «Разрешение неплатежеспособности», который является одним из десяти равновесных составляющих итогового показателя «Ведение бизнеса» и дана оценка уровня развития национальных экономико-правовых институтов несостоятельности (банкротства). Определены некоторые факторы, обуславливающие отставание Республики Беларусь и Российской Федерации от других стран, прежде всего стран бывшего СССР. На примере Индии дана оценка результатов реформирования национального законодательства об экономической несостоятельности (банкротстве) и перехода к эффективным реабилитационным процедурам должника. Сделан вывод о возможности использования подходов и методики расчета показателя «Разрешение неплатежеспособности» для разработки направлений реформирования национальных экономико-правовых институтов несостоятельности (банкротства).*

*Ключевые слова: разрешение неплатежеспособности, несостоятельность, банкротство, институт, рейтинг, Ведение бизнеса, методика, реформа.*

**Введение**

Новое десятилетие началось для Республики Беларусь с трудностей, связанных с отсутствием долгосрочных контрактов с российскими поставщиками нефти из-за налогового маневра в Российской Федерации. Проблемы с поставкой российской нефти для загрузки нефтеперерабатывающих заводов Беларуси отодвинули на задний план другие экономические проблемы, которые еще вчера активно обсуждались и были весьма актуальны. Одна из таких проблем – позиция страны в международном рейтинге «Ведение бизнеса» (Doing Business, DB), – ежегодного совместного исследования Всемирного банка и Международной финансовой корпорации, в котором дается оценка ключевым аспектам нормативно-правового регулирования предпринимательской деятельности для национальных компаний 190 стран мира, а также в отдельных городах на субнациональном и региональном уровнях.

**1. Итоги рейтинга «Ведение бизнеса» 2020**

Итоги рейтинга на 2020 год для Республики Беларусь оказались весьма неудовлетворительными: страна потеряла сразу 12 позиций, заняв лишь 49-ое место. Российская Федерация поднялась на 3 позиции, переместившись на 28-е место, но при этом оба независимых государства не достигли поставленных правительствами двух стран целей – Россия не вошла в двадцатку стран по благоприятности условий ведения бизнеса, а Беларусь – в тридцатку стран. Результаты рейтинга на 2020 год для постсоветских республик приведены ниже в Таблице 1, в которой из стран бывшего СССР не представлен лишь Туркменистан, а для остальных даны современные названия независимых суверенных государств.

Таблица 1

**Позиции стран бывшего СССР в рейтинге «Ведение бизнеса» на 2020 год**

Страна	Место	Индекс удаленности от «передового рубежа», %
Грузия	7	83,7
Литва	11	81,6
Эстония	18	80,6
Латвия	19	80,3
Казахстан	25	79,6
Российская Федерация	28	78,2
Азербайджан	34	76,7
Армения	47	74,5
Молдова	48	74,4
Беларусь	49	74,3
Украина	64	70,2
Узбекистан	69	69,9
Кыргызстан	80	67,8
Таджикистан	106	61,3

Источник: данные [www.doingbusiness.org](http://www.doingbusiness.org)

Традиционно опережают Россию в общем рейтинге прибалтийские страны, а также Грузия и Казахстан. Впереди Беларуси кроме России оказались Азербайджан, Армения и Молдова. «Снижение позиции Республики Беларусь в рейтинге «Ведение бизнеса-2020» в целом и по ряду компонентов во многом объясняется динамикой других стран, которые в 2018 году активнее улучшали условия ведения бизнеса по десяти контролируемым компонентам рейтинга», – считает Министерство экономики Республики Беларусь, комментируя сложившуюся ситуацию [5]. При этом на официальном сайте министерства подчеркивается, что в 2018–2019 годах в Республике Беларусь принят «ряд известных мер» по либерализации условий ведения предпринимательской деятельности, которые не были охвачены исследованием Всемирного банка в силу его методологии, но позитивно восприняты белорусским деловым сообществом [5].

Во многом представленные выше итоги можно объяснить по-прежнему низким значением показателя (темы) «Разрешение неплатежеспособности», который является одним из десяти равновесных слагаемых итогового показателя «Ведение бизнеса». Это, несомненно, не может не обратить на себя внимание и заслуживает отдельного изучения.

## **2. Рейтинг стран бывшего СССР по показателю «Разрешение неплатежеспособности»**

Для исследования показателя «Разрешение неплатежеспособности» снова проанализируем бывшие советские республики, но уже по выбранному показателю для того, чтобы оценить результаты развития национальных институтов экономической несостоятельности (банкротства) постсоветских стран, до недавнего времени фактически не имевших данного института (табл. 2).

Полученные результаты несколько отличаются от представленных выше в Таблице 1. Лидирующее положение в рейтинге занимают Казахстан (42-е место) и Азербайджан (47-е место), которые осуществили значительные реформы не только в сфере разрешения неплатежеспособности, но также реализовали другие регуляторные ре-

формы, что позволило им обогнать Республику Беларусь и в общем рейтинге «Ведение бизнеса», разместившись соответственно на 25-м и 34-м месте (табл. 1).

Таблица 2

**Рейтинг стран бывшего СССР по показателю  
«Разрешение неплатежеспособности» на 2020 год**

Страна	Место	Индекс удаленности от «передового рубежа», %
Казахстан	42	66,7
Азербайджан	47	63,5
Эстония	54	60,1
Латвия	55	59,8
Российская Федерация	57	59,1
Грузия	64	56,2
Молдова	67	54,8
Беларусь	74	52,9
Кыргызстан	78	50
Литва	89	46,7
Армения	95	44,6
Узбекистан	100	43,5
Украина	146	31,4
Таджикистан	153	28,4

*Источник:* данные [www.doingbusiness.org](http://www.doingbusiness.org)

Традиционно в начале рейтинга по показателю «Разрешение неплатежеспособности» располагаются страны Балтии – Эстония и Латвия (Литва значительно отстает от них), которые вступили на путь рыночных преобразований первыми и осуществляли экономические реформы значительно активнее. Однако и они сбавили темпы: если сегодня Эстония и Латвия занимают 54-е и 57-ое место соответственно, то, например, в рейтинге на 2015 год по показателю «Разрешение неплатежеспособности» их можно было обнаружить на 37-м и 40-м месте. Литва же за последние 5 лет переместилась с 67-го места в мировом рейтинге (тогда она опережала Беларусь лишь на одну позицию) на 89-ую, отстав от Республики Беларусь на пятнадцать позиций, а от Российской Федерации – на 32. Однако все три балтийские страны значительно опережают Республику Беларусь и Российскую Федерацию по месту в общем рейтинге: Литва на 11-ом, Эстония на 18-ом и Латвия на 19-м месте (табл. 1).

Опережают Республику Беларусь по показателю «Разрешение неплатежеспособности» также Российская Федерация, Грузия и Молдова. Россия в рейтинге на 2020 год опустилась с 55-го на 57-ое место по показателю «Разрешение неплатежеспособности», несмотря на незначительный рост индекса удаленности от «передового рубежа» – 59,1 против 58,4 годом ранее.

Грузия также оказалась впереди Республики Беларусь и Российской Федерации не только по показателю «Разрешение неплатежеспособности», но и опередив все страны бывшего СССР в общем рейтинге «Ведение бизнеса» (табл. 1). Эта страна вообще является лидером последних лет по масштабам регуляторных реформ, что неоднократно подчеркивалось исследователями [9].

Можно также заметить, что впереди Беларуси как по показателю «Разрешение неплатежеспособности», так и в общем рейтинге оказалась Молдова, единственная из стран бывшего постсоветского пространства, опередившая Беларусь, с уровнем дохо-

дов населения ниже среднего по методике Всемирного банка (с ВВП на душу населения 2 990 долл. США против 5 670 долл. США в Беларуси).

Традиционно в конце анализируемого списка по показателю «Разрешение неплатежеспособности» располагаются бывшие среднеазиатские республики – Узбекистан и Таджикистан.

### 3. Методика расчета показателя «Разрешение неплатежеспособности»

Определение значения показателя «Разрешение неплатежеспособности» базируется на расчете коэффициента возврата средств (долга) и индекса эффективности нормативно-правовой базы. Место страны в рейтинге определяется на основе расчета среднего арифметического значений баллов, рассчитанных для двух упомянутых показателей. Помимо коэффициента возврата средств (долга) и индекса эффективности нормативно-правовой базы в рамках проекта «Ведение бизнеса» по показателю «Разрешение неплатежеспособности» также оцениваются временные затраты, финансовые затраты (стоимость) и конечный исход разрешения неплатежеспособности кредитора. Значения упомянутых коэффициентов и индикаторов показателя «Разрешение неплатежеспособности» на 2020 год для Республики Беларусь и Российской Федерации и представлены ниже в Таблице 3.

Таблица 3

#### Индикаторы и индексы показателя «Разрешение неплатежеспособности» для Республики Беларусь и Российской Федерации на 2020 год

Индикаторы и индексы	Республика Беларусь	Российская Федерация
Время (годы)	1,5	2,0
Стоимость (% от стоимости имущества кредитора)	17,0	9,0
Конечный исход процесса (0 – распродажа имущества должника, 1 – продолжение деятельности должника)	0	0
Коэффициент возврата средств (центов с каждого 1 долл. долга)	40,2	43,0
Индекс удаленности от «передового рубежа» (для коэффициента возврата средств), %	43,2	46,3
Индекс эффективности нормативно-правовой базы (0-16), всего	10,0	11,5
Индекс удаленности от «передового рубежа» (для индекса эффективности нормативно-правовой базы), %	62,5	71,9
в т.ч.		
– индекс открытия производства по делу о несостоятельности (0-3)	2,0	2,5
– индекс управления имуществом должника (0-6)	5,5	5,0
– индекс процедуры реорганизации (0-3)	0,5	1,0
– индекс участия кредиторов (0-4)	2,0	3,0

Источник: данные [www.doingbusiness.org](http://www.doingbusiness.org)

Как видно из Таблицы 3, по показателю «Разрешение неплатежеспособности» оцениваются:

*Временные затраты (время)* – время, необходимое кредиторам для удовлетворения своих требований, определяемое в календарных годах;

*Финансовые затраты (стоимость)* – сумма расходов на завершение процесса разрешения неплатежеспособности кредитора, определяемая в процентах от стоимо-

сти имущества должника;

*Конечный исход разрешения неплатежеспособности кредитора* – результат завершения процесса разрешения неплатежеспособности: распродажа имущества должника по частям с возвратом 70% стоимости его имущества кредиторам или продолжение деятельности должника с сохранением 100% стоимости его имущества.

Непосредственно уровень показателя «Разрешение неплатежеспособности» зависит от значений следующих двух индексов:

*Коэффициент возврата средств (долга) (Recovery rate (cents on the dollar))* рассчитывается в центах с каждого доллара долга, возвращенного кредиторам в результате процесса реорганизации, ликвидации или принудительного взыскания задолженности с неплатежеспособного кредитора (путем обращения взыскания на заложенное имущество или в результате мер, предпринятых внешним управляющим по взысканию задолженности);

*Индекс эффективности нормативно-правовой базы (Strength of insolvency framework index)* позволяет оценить адекватность и целостность нормативно-правовой базы, применяемой в процедурах ликвидации и реорганизации. Более высокие значения этого индекса указывают на то, что национальная система разрешения неплатежеспособности создает более благоприятные условия для реабилитации жизнеспособных компаний и ликвидации безнадежных должников. Данный индекс является комплексным показателем, предполагающим оценку эффективности нормативно-правовой базы на основе четырех составляющих (компонентов):

- индекса открытия производства по делу о несостоятельности;
- индекса управления имуществом должника;
- индекса процедуры реорганизации;
- индекса участия кредиторов.

Каждый из четырех перечисленных выше индексов, в совокупности формирующих индекс эффективности нормативно-правовой базы, в свою очередь, также является комплексным показателем. Например, *индекс открытия производства по делу о несостоятельности (Commencement of proceedings index)* предполагает оценку трех компонентов (критериев), результаты расчета значений которых для Республики Беларусь и Российской Федерации на 2020 год отражены в таблице 4.

Таблица 4

**Индекс открытия производства по делу о несостоятельности  
для Республики Беларусь и Российской Федерации**

Показатель	Республика Беларусь	Российская Федерация
Индекс открытия производства по делу о несостоятельности (0-3)	2,0	2,5
Имеет ли должник право инициировать возбуждение производства по делу о своей ликвидации и (или) реорганизации? (а) 1 балл – должник имеет право инициировать возбуждение судом производства по делу о своей ликвидации и реорганизации; (б) 0,5 балла – должник имеет право инициировать возбуждение судом производства по делу только о своей ликвидации или только о реорганизации; (с) 0,5 балла – должник имеет право инициировать возбуждение судом производства по делу о своей несостоятельности	0,5 Должник имеет право инициировать возбуждение судом производства по делу о своей ликвидации	1,0 Должник имеет право инициировать возбуждение судом производства по делу о своей ликвидации и реорганизации
Имеют ли кредиторы право инициировать возбуждение производства по делу о ликвидации и (или) реорганизации должника?	0,5 Кредиторы имеют право	0,5 Кредитор имеет право по-

Показатель	Республика Беларусь	Российская Федерация
(a) 1 балл – кредиторы имеют право инициировать возбуждение судом производства по делу о ликвидации и реорганизации должника; (b) 0,5 балла – кредиторы имеют право инициировать возбуждение судом производства по делу только о ликвидации или только о реорганизации должника; (c) 0,5 балла – кредиторы имеют право инициировать возбуждение судом производства по делу о несостоятельности должника	инициировать возбуждение судом производства по делу о ликвидации должника	дать заявление только о ликвидации
Какой критерий (условие) используется для открытия производства по делу о несостоятельности? (a) 1 балл – используется тест ликвидности (должник не выполняет свои обязательства по мере наступления сроков их погашения); (b) 0,5 балла – используется тест оценки платежеспособности по данным бухгалтерского баланса (сумма обязательств должника превышает стоимость его активов); (c) 1 балл – используются оба теста, но результат только одного из них является основанием для открытия производства по делу о несостоятельности; (d) 0,5 балла – используются результаты обеих тестов одновременно; (e) 0 баллов – применяются другие критерии (тесты) оценки платежеспособности.	1,0 Используются оба теста оценки неплатежеспособности, но результат только одного из них является основанием для открытия производства по делу о несостоятельности	1,0 Используются оба теста оценки неплатежеспособности, но результат только одного из них является основанием для открытия производства по делу о несостоятельности

Источник: данные [www.doingbusiness.org](http://www.doingbusiness.org)

Сопоставление условий разрешения несостоятельности в Российской Федерации с Республикой Беларусь, которое в данном исследовании проводится постоянно, можно также осуществить на примере индекса эффективности нормативно-правовой базы (табл. 3). Республика Беларусь по упомянутому индексу набрала лишь 10 баллов против 11,5 баллов у соседки вследствие невозможности инициировать должником возбуждение судом производства по делу о своей реорганизации, получения приоритета кредиторами, предоставившими кредит должнику после возбуждения производства по делу о его несостоятельности перед всеми кредиторами, как обеспеченными, так и необеспеченными, а также в силу возможности участие в голосовании по плану реорганизации всех кредиторов, а не только тех, чьи интересы затрагиваются или изменяются данным планом.

Анализируя позицию Российской Федерации в рейтинге по показателю «Разрешение неплатежеспособности» следует также учесть, что она была определена для страны с учетом еще предстоящих изменений действующего законодательства об экономической несостоятельности (банкротстве), которые на момент подготовки рейтинга «Ведение бизнеса» не вступили в силу. Критерий голосования за план реструктуризации, который определяет, что голосуют лишь те кредиторы, чьи права затрагиваются планом реструктуризации, соответствует положениям недействующего Закона Российской Федерации «О несостоятельности (банкротстве)» от 26 окт. 2002 г. № 127-ФЗ [4], а определен законопроект 239932-7 «О внесении изменений в Федеральный закон «О несостоятельности (банкротстве)» и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части процедуры реструктуризации долгов в делах о банкротстве юридических лиц», который еще находится на рассмотрении в нижней палате российского парламента» [7]. И одновременно другой предложенный Минэкономразвития законопроект об изменении Закона в части повышения гарантий независимости арбитражного управляющего в ходе дела о банкротстве и

находящийся на стадии оценки регулирующего воздействия, в случае его принятия снизит в будущем показатель эффективности нормативно-правовой базы, поскольку исключает полномочие собрания кредиторов выбрать управляющего.

Кратко рассмотренная выше методика расчета показателя «Разрешение неплатежеспособности» была разработана на основе руководящих принципов Всемирного Банка «Principles for Effective Insolvency and Creditor/Debtor Regimes» и руководства Комиссии Организации Объединенных Наций по праву международной торговли (ЮНСИТРАЛ) «Руководство для законодательных органов по вопросам законодательства о несостоятельности» [14], а непосредственными разработчиками были S. Djankov, C. McLiesh – специалисты Всемирного банка и O. Hart, A. Shleifer – сотрудники Гарвардского университета [10].

Ввиду ярко выраженной «национальности» законодательства о банкротстве, на которую указывает, например, заслуженный юрист Республики Беларусь, д.ю.н., профессор, заведующий кафедрой финансового права и правового регулирования хозяйственной деятельности Белорусского государственного университета В.С. Каменков [2], для обеспечения большей сопоставимости разработчики рейтинга «Ведение бизнеса» используют для исследования гипотетическую модель условной организации и ряд исходных предпосылок. Например, предполагается, что при оценке показателя «Разрешение неплатежеспособности» речь идет об обществе с ограниченной ответственностью, расположенном в крупнейшем (или во втором по величине) деловом центре страны. Главному участнику общества принадлежит 51% долей в уставном фонде, остальные участники общества имеют доли менее 5% каждый. В штате общества 201 сотрудник, а руководит им наемный директор и т.д. Но даже несмотря на условность используемой модели и учитывая другие ограничения рейтинга «Ведение бизнеса», можно заметить, что методика расчета показателя «Разрешение неплатежеспособности» охватывает основные этапы подготовки и проведения производства по делу об экономической несостоятельности (банкротстве) от момента открытия производства по делу о несостоятельности до реализации процедур реабилитации должника, что, по нашему мнению, делает ее вполне пригодной для использования на национальном уровне не только для оценки достигнутых результатов, но и для разработки направлений дальнейшего реформирования микро-правового института несостоятельности (банкротства) в отдельной стране.

Данный вывод подтверждает динамика индексов и индикаторов показателя «Разрешение неплатежеспособности» для Республики Беларусь, представленная в Таблице 5.

Аналогичная динамика для Российской Федерации представлена в Таблице 6.

Таблицы 5 и 6 реально отражают ситуацию, складывающуюся в последние семь лет в двух странах в части развития и совершенствования действующего экономико-правового института несостоятельности (банкротства), когда все наиболее доступные средства и незначительные реформы были в основном использованы и реализованы, что привело практически к замедлению динамики по индексам и индикаторам показателя «Разрешение неплатежеспособности».

Этот же вывод следует из данных Всемирного банка: в минувшем 2019 году положительных реформ (в терминологии рейтинга «Ведение бизнеса») для Беларуси в отчете 2020 года, например, не зафиксировано вообще, а в России таких положительных реформ было три (табл. 7).

Особенно отчетливо последствия отсутствия реформ сказываются на Республике Беларусь, у которой наблюдается лишь не всегда положительное колебание коэффициента возврата средств. У Российской Федерации некоторая положительная динамика пролеживается, но только по трем из семи индексов и индикаторов. И по-прежнему для обеих стран конечным исходом разрешения проблем неплатежеспособности будет прекращение деятельности должника и распродажа его имущества. Такая ситуация резко контрастирует с тенденцией, складывающейся в мире, где все отчетливее

прослеживается процессуальный плюрализм, цель которого – более гибкое урегулирование отношений, возникающих в результате неплатежеспособности участников гражданского и торгового оборота [3, с. 145].

Таблица 5

**Изменение индексов и индикаторов показателя  
«Разрешение неплатежеспособности» для Республики Беларусь за 2014–2020 годы**

Год рейтинга	Индекс удаленности от «передового рубежа», %	Конечный исход процесса (0 – распродажа имущества должника, 1 – продолжение деятельности должника)	Время (годы)	Стоимость (% от стоимости имущества кредитора)	Коэффициент возврата средств (центов с каждого долл. долга)	Индекс эффективности нормативно-правовой базы (0-16)	Индекс открытия производства по делу о несостоятельности (0-3) (методология DB15-20)	Индекс управления имуществом должника (0-6) (методология DB15-20)	Индекс процедуры реорганизации (0-3) (методология DB15-20)	Индекс участия кредиторов (0-4) (методология DB15-20)
DB2020	52,9	0	1,5	17	40,2	10	2	5,5	0,5	2
DB2019	52,6	0	1,5	17	39,6	10	2	5,5	0,5	2
DB2018	51,3	0	1,5	17	37,2	10	2	5,5	0,5	2
DB2017	50,3	0	1,5	17	35,5	10	2	5,5	0,5	2
DB2016	41,9	0	3	22	19,7	10	2	5,5	0,5	2
DB2015	41,8	0	3	22	19,5	10	2	5,5	0,5	2
DB2014	41,7	0	3	22	19,3	10	2	5,5	0,5	2

Источник: данные www.doingbusiness.org

Таблица 6

**Изменение индексов и индикаторов показателя  
«Разрешение неплатежеспособности» для Российской Федерации за 2014–2020 годы**

Год рейтинга	Индекс удаленности от «передового рубежа», %	Конечный исход процесса (0 – распродажа имущества должника, 1 – продолжение деятельности должника)	Время (годы)	Стоимость (% от стоимости имущества кредитора)	Коэффициент возврата средств (центов с каждого долл. долга)	Индекс эффективности нормативно-правовой базы (0-16)	Индекс открытия производства по делу о несостоятельности (0-3) (методология DB15-20)	Индекс управления имуществом должника (0-6) (методология DB15-20)	Индекс процедуры реорганизации (0-3) (методология DB15-20)	Индекс участия кредиторов (0-4) (методология DB15-20)
DB2020	78,2	0	2	9	43	11,5	2,5	5	2,5	3
DB2019	77,4	0	2	9	41,7	11,5	2,5	5	2,5	3
DB2018	76,5	0	2	9	40,2	11,5	2,5	5	2,5	3
DB2017	75,3	0	2	9	38,6	11,5	2,5	5	2,5	3
DB2016	74,1	0	2	9	41,7	11,5	2,5	5	2,5	3
DB2015	69,2	0	2	9	43	11,5	2,5	5	2,5	3
DB2014	67,5	0	2	9	43,2	11,5	2,5	5	2,5	3

Источник: данные www.doingbusiness.org

**Количество проведенных реформ в Республике Беларусь  
и Российской Федерации за последние два года**

Страна	Место в DB2020	Индекс удаленности от «передового рубежа», %		Количество проведенных реформ	
		DB 2019	DB 2020	DB2019	DB 2020
Беларусь	49	74,4	74,3	2	0
Российская Федерация	28	77,4	78,2	4	3

*Примечание* – источник: [1]

В развитых рыночных странах на передний план выдвигаются задачи сохранения организации, а значит, и собственности ее владельца путем изменения системы управления, реструктуризации кредиторской задолженности, предоставления кредитов, отсрочки и рассрочки платежей и др. способами. Государство и общество становятся все больше заинтересованными не в ликвидации предприятия-должника, а в восстановлении его платежеспособности посредством специальных процедур, предусмотренных законодательством об экономической несостоятельности (банкротстве) [11, с. 58; 8, с. 20–21].

Именно поэтому сегодня большинство стран, реформирующих свое законодательство в сфере банкротства, старается на практике реализовать подходы и внедрить процедуры, помогающие реабилитировать и сохранить должника. Этот вывод подтверждают и итоги международного проекта «Ведение бизнеса». Даже невзирая на то, что, лишь у порядка 24% стран, охваченных проектом «Ведение бизнеса», результатом завершения процесса разрешения неплатежеспособности (конечным исходом) будет продолжение деятельности должника с сохранением 100% стоимости его имущества, тенденция перехода к эффективным реабилитационным процедурам, позволяющим восстановить финансовую состоятельность экономически жизнеспособных компаний, предотвратить продажу имущества по частям (piecemeal liquidation), а также обеспечить защиту прав и интересов кредиторов, является на сегодняшний день преобладающей.

Этот вывод подтверждает пример Индии, которую еще недавно можно было отнести к странам с прокредиторской концепцией законодательства о банкротстве и для предприятия-должника которой конечным исходом разрешения неплатежеспособности скорее всего была бы его ликвидация. Такая ситуация логично вытекала из исторической общности Индии и Великобритании, где в законодательстве Англии и Уэльса, а также Ирландии последовательно реализованы принципы радикально прокредиторской концепции. Распространение английского права исторически происходило на подконтрольных Британской империи территориях, и, в некотором смысле, сохранялось там в первозданном виде вплоть до наших дней. Законодательство о несостоятельности (банкротстве) Индии, зачатки которого, как считают специалисты, можно найти в Законе правительства Индии (Government of India Act) 1800 года [13, р. 63], также основывалось до недавнего времени на доктринальных элементах правовой системы Англии и Уэльса.

Однако в последние годы Индия по показателю «Разрешение неплатежеспособности» в рейтинге «Ведение бизнеса» стремительно переместилась со 108 места в прошлом году на 52 место в 2020 г., значительно опередив не только Республику Беларусь и Российскую Федерацию, но многие другие европейские страны. Основная причина успеха Индии – комплексное реформирование законодательства в сфере банкротства, связанное с принятием в 2016 г. нового Кодекса о несостоятельности и банкротстве (Insolvency and Bankruptcy Code, IBC). Реформирование коснулось нескольких аспектов и в первую очередь – это введение новой процедуры реорганизации как альтернативы традиционным ликвидационным процедурам, а также широкое внедре-

ние планов реструктуризации задолженности.

Помимо введения реабилитационной процедуры, в рамках реформы законодательства Индии был создан новый национальный регулятор в сфере банкротства – Совет по вопросам несостоятельности и банкротства Индии (Insolvency and Bankruptcy Board of India), учрежден новый специализированный судебный орган – Национальный суд по делам компаний (National Company Law Tribunal), а также введены новые правила по лицензированию антикризисных управляющих. Кроме того, сегодня в стране активно обсуждаются изменения в законодательстве, регулирующие вопросы международного права в сфере банкротства в соответствии с Типовым Законом Комиссии Организации объединенных наций по праву международной торговли (ЮНСИТРАЛ) о трансграничной несостоятельности [12], а также специальным регулированием ЮНСИТРАЛ в части банкротства групп компаний [15].

### Заключение

Анализ результатов Республики Беларусь и Российской Федерации, достигнутых странами в рейтинге «Ведение бизнеса» на 2020 г. по показателю «Разрешение неплатежеспособности», а также исследование методики показателя показало, что дальнейшее продвижение в направлении роста и приближения к передовым рубежам возможно лишь при проведении коренных реформ преобразований, которые затрагивают саму природу сдерживающих развитие институтов и укладов, и в частности, экономико-правового института несостоятельности (банкротства). По-видимому, осознавая это, разработчики Плана действий по улучшению рейтинговых позиций Республики Беларусь в отчете Всемирного банка «Ведение бизнеса», подготовленного к Государственной программе «Малое и среднее предпринимательство в Республике Беларусь» на 2016–2020 гг. намеревались еще в декабре 2017 г. в качестве формы выполнения мероприятий по достижению прогнозных значений индикаторов и повышению позиции Республики Беларусь в рейтинге принять Закон Республики Беларусь «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Беларусь «Об экономической несостоятельности (банкротстве)» [6, с. 22–23]. Эти планы, к сожалению, не реализованы до настоящего времени. Однако «правительство Республики Беларусь намерено продолжить реализацию комплекса реформ во всех сферах деятельности, в том числе, с учетом положительного опыта зарубежных стран и рекомендаций Всемирного банка», – указано в информации Министерства экономики Республики Беларусь по результатам отчета Всемирного банка «Ведение бизнеса 2020» [5]. Следовательно, предстоит дальнейшее глубокое и детальное исследование методики международного рейтинга «Ведение бизнеса» и изучения мирового опыта для реформирования экономико-правового института несостоятельности (банкротства) в Республике Беларусь и Российской Федерации.

### Список литературы:

1. Ведение бизнеса 2020. Информационная справка: Европа и Центральная Азия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://russian.doingbusiness.org/content/dam/doingBusiness/pdf/db2020/DB20-FS-ECA---russian.pdf> (дата обращения: 01.11.2019).
2. Каменков В.С. Мировое соглашение в деле о банкротстве / В.С. Каменков // Вестник Высшего Хозяйственного Суда Республики Беларусь. – 2009. – №2. – с. 24–40.
3. Королев Ю.Ю. Сравнительный анализ процедур банкротства в Республике Беларусь и за рубежом / Ю.Ю. Королев // Инновационные процессы и корпоративное управление: материалы X Международной заочной научно-практической конференции, 15–31 марта 2018 г., Минск : сборник статей / Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет, Институт бизнеса; редкол.: В.В. Апанасович (гл. ред.), А.И. Ковалинский, Е.М. Минченко. – Минск : Колорград, 2018. – с. 142–149.
4. О несостоятельности (банкротстве). Федеральный закон от 26.10.2002 № 127-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_39331/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_39331/) (дата обращения: 01.11.2019).

5. О результатах отчета Всемирного банка «Ведение бизнеса 2020». Министерство экономики Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://economy.gov.by/ru/news-ru/view/o-rezultatax-otcheta-vsemirnogo-banka-vedenie-biznesa-2020-45016-2019/> (дата обращения: 01.11.2019).
6. План действий по улучшению рейтинговых позиций Республики Беларусь в отчете Всемирного банка «Ведение бизнеса». Приложение 3 к Государственной программе «Малое и среднее предпринимательство в Республике Беларусь» на 2016–2020 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.economy.gov.by/ru/doing\\_business-ru/](http://www.economy.gov.by/ru/doing_business-ru/) (дата обращения: 01.11.2019).
7. Пояснительная записка к проекту федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «О несостоятельности (банкротстве)» и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части процедуры реструктуризации долгов в делах о банкротстве юридических лиц» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://npsmpau.ru/239932-7.pdf> (дата обращения: 10.02.2020).
8. Фролов И.В. Проблемы прокредиторской и продолжниковой концепции современного российского законодательства о несостоятельности (банкротстве) // Предпринимательское право. – 2011. – №4. – с. 20–25.
9. Bruhn M., Loeprick J. Small business tax policy, informality, and tax evasion: Evidence from Georgia / Miriam Bruhn, Jan Loeprick. – Policy Research Working Paper 7010. – World Bank, 2014. – 33 p.
10. Djankov S., Hart, O., McLiesh, C., Shleifer, A. Debt Enforcement around the World / Simeon Djankov, Oliver Hart, Caralee McLiesh, Andrei Shleifer // Journal of Political Economy. – 2008. – Vol. 116 – No. 6. – Pp. 1105–1149.
11. Karaleu Y. Determination, Criterion and Efficiency Evaluation of Insolvency in the International and Belarusian Restructuring and Insolvency Practice / Y.Y. Karaleu // Бизнес. Инновации. Экономика (Business. Innovations. Economics) : сб. науч. ст. Выпуск 2 / Институт бизнеса БГУ; редкол.: Г.А. Хацкевич (председатель). – Минск: ЗАО «Оргстрой», 2018. – с. 50–59.
12. Model Law on Cross-Border Insolvency. United Nations Commission on International Trade Law. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://unov.tind.io/record/7256?ln=en> (дата обращения: 01.12.2019).
13. Rajoria K. Insolvency and bankruptcy code of India: the past, the present and the future. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iblj-forum.org/insolvency-and-bankruptcy-code-of-india-the-past-the-present-and-the-future/> (дата обращения: 10.02.2020).
14. Resolving Insolvency methodology. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.doingbusiness.org/en/methodology/resolving-insolvency> (дата обращения: 10.02.2020).
15. UNCITRAL legislative guide on insolvency law, part three : treatment of enterprise groups in insolvency. United Nations Commission on International Trade Law. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://unov.tind.io/record/40249?ln=en> (дата обращения: 01.12.2019).

## **DOING BUSINESS'2020 RESULTS: PROBLEMS AND PERSPECTIVES OF IMPROVEMENT OF THE ECONOMIC AND LEGAL INSTITUTE OF INSOLVENCY (BANKRUPTCY)**

**Yury Y. Karaleu,**

*School of Business of Belarusian State University, Minsk, Belarus*

*Abstract. The article analyzes the results of the Doing Business international rating for 2020 for the Republic of Belarus and the Russian Federation. Based on the actual rating data for two countries, the author investigated the methodology of the Resolving insolvency indicator, which is one of ten equilibrium components of the final Doing Business indicator and assesses the level of development of national economic and legal institutions of insolvency (bankruptcy). Some factors determining the lag of the Republic of Belarus and the Russian Federation from other countries, primarily the countries of the former USSR, are identified. On the example of India, the results of reforming the national legislation on economic insolvency (bankruptcy) and the transition to effective rehabilitation procedures of the debtor are evaluated. It is concluded that it is possible to use approaches and methods of calculating the Resolving insolvency indicator to develop areas for reforming national economic and legal institutions of insolvency (bankruptcy).*

Keywords: *resolution of insolvency, insolvency, bankruptcy, institution, rating, Doing Business, methodology, reform.*

#### References:

1. Doing Business 2020. Region Profile: Europe & Central Asia. Web. 01 Nov. 2019 <<https://russian.doingbusiness.org/content/dam/doingBusiness/pdf/db2020/DB20-FS-ECA---russian.pdf>>.
2. Kamenkov V.S. «Mirovye soglasenie v dele o bankrotstve» (Bankruptcy Settlement) Vestnik Vysshego Hozajstvennogo Suda Respubliki Belarus 2 (2009): 24-40.
3. Karaleu Y.Y. *Sravnitel'nyj analiz procedur banrotstva v Respublike Belarus i zarubezhom*. Minsk : Kolorgrad, 2018. – Pp. 142–149.
4. O nesostojatel'nosti (bankrotstve). Federalnij zakon ot 26.10.2002 № 127-FZ. Web. 01 Nov. 2019 <[http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_39331/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_39331/)>.
5. O rezultatah otcheta Vsemirnogo Banka «Vedenie biznesa 2020». Ministerstvo ekonomiki Respubliki Belarus. Web. 01 Nov. 2019 <<http://economy.gov.by/ru/news-ru/view/o-rezultatax-otcheta-vsemirnogo-banka-vedenie-biznesa-2020-45016-2019/>>.
6. Plan dejstvij po uluchsheniju rejtingovyh pozicij Respubliki Belarus v otchete Vsemirnogo banka «Vedenie biznesa». Prilozhenie 3 k Gosudarstvennoj programme «Maloe i srednee predprinimatel'stvo v Respublike Belarus» na 2016-2020 gg. Web. 01 Nov. 2019 <[www.economy.gov.by/ru/ding\\_business-ru/](http://www.economy.gov.by/ru/ding_business-ru/)>.
7. Pojasnitelnaja zapiska k proektu federal'nogo p'riyuf «O vnesenii izmenenij v Federalnij zakon «O nesostojatel'nosti (bankrotstve)» i otdelnye akty Rossijskoj Federacii v chasti procedury restrukturalizacii dolgov v delah o bankrotstve uridicheskikh lic» Web. 10 Jan. 2020 <<https://npmsopau.ru/239932-7.pdf>> (дата обращения: 10.02.2020).
8. Frolov I.V. «Problemy prokreditorskoy i prodolzhnikovoj koncepcii sovremennogo rossijskogo zakonodatel'stva o nesostojatel'nosti (bankrotstve)» (Problems of pro-creditor and continuity concepts of modern Russian legislation on insolvency (bankruptcy)) Predprinimatelskoe pravo 4 (2011): 20–25.
9. Bruhn M., Loeprick J. Small business tax policy, informality, and tax evasion: Evidence from Georgia / Miriam Bruhn, Jan Loeprick. – Policy Research Working Paper 7010. – World Bank, 2014. – 33 p.
10. Djankov S., Hart, O., McLiesh, C., Shleifer, A. «Debt Enforcement around the World» Journal of Political Economy 116/ 6 (2008): 1105-1149.
11. Karaleu Y.Y. Determination, Criterion and Efficiency Evaluation of Insolvency in the International and Belarusian Restructuring and Insolvency Practice Business. Innovations. Economics 2 (2018):50-59.
12. Model Law on Cross-Border Insolvency United. Nations Commission on International Trade Law. Web. 01 Dec. 2019 <<https://unov.tind.io/record/7256?ln=en>>.
13. Rajoria K. Insolvency and bankruptcy code of India: the past, the present and the future. International Business Law Journal 1(2018). Web. 10 Feb. 2020 <<https://iblj-forum.org/insolvency-and-bankruptcy-code-of-india-the-past-the-present-and-the-future/>>.
14. Resolving Insolvency methodology. Web. 10 Feb. 2020 <<https://www.doingbusiness.org/en/methodology/resolving-insolvency>>.
15. UNCITRAL legislative guide on insolvency law, part three : treatment of enterprise groups in insolvency. United Nations Commission on International Trade Law. Web. 01 Dec. 2019 <<https://unov.tind.io/record/40249?ln=en>>.

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

**Королев Юрий Юрьевич**, к.э.н., доцент, профессор кафедры бизнес-администрирования ГУО «Институт бизнеса Белорусского государственного университета» (ИБ БГУ), 220004, Минск, ул. Обойная, 7  
e-mail: [kafedra@sbmt.by](mailto:kafedra@sbmt.by)

**Yury Y. Karaleu**, Ph.D. in Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Business Administration School of Business of Belarusian State University  
7, Oboinaya St., Minsk, 220004, Belarus  
e-mail: [kafedra@sbmt.by](mailto:kafedra@sbmt.by)

Статья поступила в редакцию 12.02.2020 г.

УДК 330.145:336

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.43>

## КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ОБОРОТНЫМ КАПИТАЛОМ КОМПАНИИ

**Н.А. Маркова**

*Волжский государственный университет водного транспорта,*

*г. Нижний Новгород, Россия*

*Аннотация. Оборотный капитал компании обеспечивает непрерывность процесса производства и реализации продукции, работ, услуг. На этапе растущей экономики эффективное управление оборотным капиталом позволяет с максимальной отдачей для бизнеса реализовать намеченные цели и получить конкурентные преимущества за счет ускорения оборачиваемости оборотных активов. Целью статьи является разработка комплексного подхода к управлению оборотным капиталом компании. Для достижения заявленной цели были изучены действующие методики планирования потребности в оборотных активах компании; осуществлена критическая оценка моделей управления оборотным капиталом отечественных и зарубежных авторов. В статье представлен комплекс взаимосвязанных мероприятий по управлению оборотным капиталом компании включающий четыре последовательных этапа. Научная новизна исследования заключается в совершенствовании методики планирования потребности в оборотных активах компании, основанной на нормировании; разработке и предложении рекомендаций по формированию страховых резервов в разрезе элементов оборотных активов; обосновании выбора показателя оборачиваемости оборотных активов, как основного при сравнении в различном сочетании подходов к формированию оборотных активов компании и стратегий финансирования запланированной потребности в оборотных активах. Рекомендации по формированию страховых резервов в разрезе элементов оборотных активов уточняют расчет потребности в оборотных активах и позволяют в современных условиях хозяйствования наиболее тесно приблизиться к складывающимся условиям хозяйствования и максимально соответствовать выбранному подходу к формированию оборотных активов компании в запланированном периоде. Приём графического наложения выбранного подхода к формированию оборотных активов компании и стратегии формирования источников финансирования запланированной потребности в оборотных активах наглядно подчеркивает взаимосвязь запланированной потребности в оборотных активах с составом и структурой капитала компании в рамках выбранной стратегии финансирования. Выбор управленческого решения при этом зависит от значения показателя ускорения оборачиваемости оборотных активов в сочетании с повышением финансовой устойчивости компании на перспективу. Разработанный комплекс мероприятий по управлению оборотным капиталом компании ориентирован на широкое использование организациями нашей страны.*

*Ключевые слова: оборотные активы, политика формирования оборотных активов, постоянная и переменная части оборотных активов, стратегия финансирования оборотных активов, управление оборотным капиталом компании.*

### Введение

Анализ состава и структуры оборотных активов в целом по стране, проведенный автором ранее [1], подчеркивает актуальность рассматриваемого вопроса. Экономический рост страны и неуклонное увеличение размера используемых оборотных активов требуют постоянного пересмотра применяемых на практике подходов к управлению оборотным капиталом компании.

Организация процесса управления оборотным капиталом является одной из ключевых функций финансовой службы компании. Этот процесс включает в себя комплекс взаимосвязанных мероприятий, которые составляют содержание политики

управления оборотным капиталом предприятия. Рассмотрим последовательно эти мероприятия.

### Анализ оборотных активов компании

Разработку политики управления оборотным капиталом компании необходимо начинать с анализа оборотных активов за предшествующие периоды. В ходе анализа оценивается состав и структура оборотных активов; сопоставляются темпы изменения их средней величины с темпами изменения выручки; рассчитывается и оценивается оборачиваемость всех элементов оборотных активов; дается оценка рентабельности оборотных активов по прибыли от продаж и экономической рентабельности

Примерный анализ состава и структуры оборотных активов в динамике приведен в таблице 1.

Таблица 1

Анализ состава и структуры оборотных активов АО «XXX» за 2017–2018 гг.

Показатели	на 01.01.2017 г.		на 01.01.2018 г.		на 01.01.2019 г.		Абс. изм., тыс. руб.		Темпы роста, %	
	сумма, тыс. руб.	уд. вес, %	сумма, тыс. руб.	уд. вес, %	сумма, тыс. руб.	уд. вес, %	за 2017 год	за 2018 год	за 2017 год	за 2018 год
Запасы	154,77	25,58	304,40	26,41	342,03	30,54	149,63	37,63	196,68	112,36
Готовая продукция	25,12	4,15	24,48	2,12	16,71	1,49	-0,64	-7,77	97,45	68,26
Дебиторская задолженность	398,59	65,86	451,33	39,16	705,99	63,04	52,74	254,66	113,23	156,42
Финансовые вложения	14,29	2,36	330,00	28,64	-	-	315,71	-330,00	в 23,09 раза	-
Денежные средства	12,40	2,05	42,19	3,67	55,17	4,93	29,79	12,98	340,24	130,77
Итого оборотных активов	605,72	100,00	1152,40	100,00	1119,90	100,00	547,23	-32,50	190,43	97,18

По результатам проведенного анализа можно сделать ряд выводов.

В структуре оборотных активов анализируемого предприятия (данные табл. 1) преобладает величина дебиторской задолженности. На 1 января 2017 и 2018 годов ее доля составляет 65,86 % и 63,04% соответственно; на начало 2018 года доля дебиторской задолженности уменьшилась до 39,16% из-за значительного увеличения размера финансовых вложений компании, но в абсолютном выражении произошел ее рост на 52,74 тыс. руб. Величина запасов в анализируемом периоде увеличилась почти в 2 раза и на 1 января 2019 года их доля в структуре оборотных активов составила 30,54%. Таким образом, проведенный анализ состава и структуры оборотных активов компании позволяет выделить основные элементы оборотных активов, которым будет уделено внимание в ходе разработки политики управления оборотными активами предприятия на перспективу.

Проанализируем темпы изменения средней величины оборотных активов и темпы изменения величины выручки компании. Результаты расчетов представим в таблице 2.

Таблица 2

## Динамика темпов роста выручки и среднего объема оборотных активов АО «XXX» за 2017–2018 гг.

Показатели	Сумма, тыс. руб.		Изменения	
	2017 год	2018 год	Сумма, тыс. руб.	Темп роста, %
Выручка	3792,34	4276,11	483,77	112,76
Средний объем оборотных активов	878,79	1136,15	257,36	129,29
Средний объем запасов	229,59	323,22	93,63	140,78
Средний объем готовой продукции	24,80	20,60	-4,20	83,06
Средний объем дебиторской задолженности	424,96	578,66	153,70	136,17
Средний объем финансовых вложений	172,15	165,00	-7,15	95,85
Средний объем денежных средств	27,30	48,68	21,38	178,32

Сопоставляя темпы роста выручки компании и темпы роста объема оборотных активов (данные табл. 2) можно сказать, что золотое правило бизнеса не выполняется: темп роста среднего объема оборотных активов составляет 129,29% и превышает темп роста выручки (выручка в анализируемом периоде выросла на 12,76%). На ситуацию, главным образом, повлияло увеличение среднего размера запасов компании (на 40,78%) и дебиторской задолженности (на 36,17%).

Перейдем к расчету и анализу показателей оборачиваемости оборотных активов в целом и по элементам. Результаты расчета показателей оборачиваемости представим в таблице 3.

Таблица 3

## Динамика показателей оборачиваемости АО «XXX» за 2017–2018 гг.

Показатели	2017 год	2018 год	изменение
Оборачиваемость:			
– оборотных активов (кол-во оборотов за период)	4,32	3,76	-0,56
– оборотных активов (в днях)	83,33	95,74	12,41
– запасов (кол-во оборотов за период)	16,52	13,23	-3,29
– запасов (в днях)	21,79	27,21	5,42
– готовой продукции (кол-во оборотов за период)	152,92	207,58	54,66
– готовой продукции (в днях)	2,35	1,73	-0,62
– дебиторской задолженности (кол-во оборотов за период)	8,92	7,39	-1,53
– дебиторской задолженности (в днях)	40,36	48,71	8,35
– кредиторской задолженности (кол-во оборотов за период)	12,05	12,89	0,84
– кредиторской задолженности (в днях)	29,88	27,93	-1,95

Анализируя данные таблицы 3 можно сказать, что оборачиваемость оборотных активов в целом уменьшилась в 2018 году по сравнению с 2017 годом на 0,56 раза, а продолжительность одного оборота увеличилась на 12,41 дня. На замедление оборачиваемости основное влияние оказали запасы и дебиторская задолженность.

Количество оборотов запасов в 2018 году по сравнению с 2017 годом уменьшилось на 3,29 раз, а продолжительность одного оборота увеличилась на 5,42 дней. В первую очередь это связано с увеличением объема производства, но поскольку темп

роста выручки значительно отстает от темпа роста запасов, то необходимо разработать меры по совершенствованию управления ими и отразить их в политике управления оборотными активами на перспективу. Оборачиваемость дебиторской задолженности также замедлилась в 2018 году по сравнению с 2017 годом: количество ее оборотов уменьшилось на 1,53 раза, а продолжительность одного оборота увеличилась на 8,35 дней. Следовательно, необходимо обратить на это внимание и принять меры по ускорению оборачиваемости дебиторской задолженности, по улучшению организации расчетов и работы с дебиторами.

По остальным элементам оборотных активов наблюдается ускорение оборачиваемости, что говорит об улучшении управления ими.

В анализируемом периоде произошло ускорение оборачиваемости кредиторской задолженности на 0,84 раза, а продолжительность одного оборота сократилась на 1,95 дня, даже не смотря на увеличение кредиторской задолженности в абсолютном значении на 17,07 тыс. руб. в 2018 году по сравнению с 2017 годом. При сравнении абсолютного значения размера кредиторской задолженности компании с размером дебиторской задолженности видно, что в 2017 и в 2018 году размер дебиторской задолженности превышает размер кредиторской задолженности. Следовательно, в результате того, что компания дорожит своей репутацией, она продолжает выполнять свои обязательства несмотря на то, что дебиторская задолженность увеличивается.

Дадим оценку рентабельности оборотных активов по прибыли от продаж и экономической рентабельности. Результаты расчетов представим в таблице 4.

Таблица 4

**Анализ рентабельности оборотных активов АО «XXX» за 2017–2018 гг.**

Показатели	2017 год	2018 год	Абсолютное изменение	Темп прироста, %
Прибыль от продаж, тыс. руб.	135,85	210,50	74,65	54,95
Прибыль до налогообложения, тыс. руб.	(9,70)	4,07	13,77	-
Выручка, тыс. руб.	3792,34	4276,11	483,77	12,76
Рентабельность продаж по прибыли от продаж, %	3,58	4,92	1,34	37,42
Рентабельность продаж по прибыли до налогообложения, %	-	0,10	-	-
Рентабельность оборотных активов по прибыли от продаж, %	15,46	18,53	3,07	19,85
Рентабельность оборотных активов по прибыли до налогообложения, %	-	0,36	-	-

Исходя из данных, представленных в таблице 4, можно сказать, что размер прибыли от продаж и прибыли до налогообложения увеличился. Темп роста прибыли от продаж (54,95%) в анализируемом периоде превышает темп роста выручки (12,76%), а это означает, что на повышение эффективности деятельности компании оказало влияние значительное снижение себестоимости продукции. В 2018 году по сравнению с предыдущим периодом увеличилась рентабельность продаж на 1,34% и рентабельность оборотных активов на 3,07%, что говорит о повышении эффективности деятельности компании. Расчет показателя экономической рентабельности необходим для принятия возможного решения при формировании структуры капитала компании.

### **Политика формирования оборотных активов компании**

Второй блок мероприятий связан с определением политики формирования оборотных активов компании. В ходе разработки указанной политики финансовый менеджер должен найти компромисс между риском и эффективностью деятельности предприятия. Особенность выбора заключается в том, что состав и структура формирования оборотных активов определяется компанией самостоятельно, исходя из целей ведения бизнеса.

В экономической литературе выделяют три подхода к формированию оборотных активов: консервативный, умеренный и агрессивный.

Консервативный подход ориентирован на создание значительных по величине страховых резервов.

Умеренный подход к формированию оборотных активов предполагает создание оптимального размера страховых резервов, обеспечивающих непрерывность кругооборота средств компании.

Агрессивный подход формирования оборотных активов связан с полным отсутствием страховых резервов.

Выбранный подход при определении политики формирования оборотных активов компании напрямую связан с расчетом потребности в оборотных активах.

В отечественной экономической практике, на наш взгляд, только нормирование [2–4], [5, с. 21–23] включает методику расчета страхового запаса по материалам. Расчет нормативов по другим элементам оборотных активов не включает страховой резерв. Более того, наиболее ликвидные элементы оборотных активов вообще не охвачены нормированием.

Мы считаем, что по незавершенному производству, как элементу оборотных активов, нецелесообразно предусматривать страховой резерв, так как включение времени отклонений внутри производственного цикла предполагает планирование нарушения технологии производства продукции. Это допустимо только по новым видам деятельности, где технология производства продукции еще только апробируется.

Страховой резерв по готовой продукции может включать время формирования партии отгружаемой продукции, а также время резерва произведенной продукции на складе компании.

Объем планируемой текущей дебиторской задолженности не включает страховой резерв, так как формируется в пределах договорных сроков расчетов, а вероятность досрочной оплаты сложно спланировать. Планируемый страховой резерв по дебиторской задолженности, как элементу оборотных активов, рекомендуем рассчитывать по возможной просроченной дебиторской задолженности, размер которой целесообразно определить эмпирическим путем.

Страховой резерв по денежным средствам, на наш взгляд, находится в диапазоне между верхним пределом остатков денежных средств и оптимальном их остатком. Определение конкретной величины этого резерва, а, следовательно, и планирование остатка денежных средств, является решением финансовой дирекции компании.

Несмотря на явные преимущества нормирования над другими методами планирования потребности в оборотных активах наибольшее распространение получила методика планирования, основанная на оборачиваемости элементов оборотных активов.

Оборачиваемость отдельных элементов оборотных активов напрямую связана с расчетом длительности операционного, производственного и финансового циклов и определением соотношения между указанными циклами. Анализ продолжительности финансового цикла в динамике обусловлен экономическим содержанием оборотного капитала компании, который в процессе кругооборота последовательно проходит смену форм капитала: начиная с денежной, затем переходит в товарную форму, далее в производственную, вновь переходит в товарную форму и завершает кругооборот в денежной форме. Более того, анализ финансового цикла в динамике, позволяет наглядно продемонстрировать складывающуюся ситуацию по соотношению между

периодом обращения дебиторской и кредиторской задолженностями, что напрямую влияет на принятие финансового решения по выбору стратегии финансирования потребности в оборотных активах.

Расчет потребности в оборотных активах рекомендуется завершить оценкой ликвидности компании и рентабельности используемых активов в планируемом периоде [6]. Такая оценка обусловлена, прежде всего, ролью оборотных активов в кругообороте средств организации. Ликвидность компании напрямую связана с составом и структурой используемых оборотных активов и гарантирует возможность своевременного исполнения финансовых обязательств и обеспечивает непрерывность оборота капитала. Прогнозное значение уровня экономической рентабельности позволит оценить не только уровень доходности используемых активов, но и позволит объективно сформировать структуру капитала компании [7].

#### **Определение соотношения между постоянной и переменной частью оборотных активов компании**

Следующий блок мероприятий связан с определением соотношения постоянной и переменной частями оборотных активов компании.

Постоянная часть оборотных активов не зависит от особенностей деятельности компании и представляет собой необходимый минимум оборотных активов, обеспечивающий непрерывность текущей производственной деятельности. Переменная часть оборотных активов, напротив, напрямую зависит от различных колебаний ведения бизнеса.

Соотношение между постоянной и переменной частью оборотных активов компании целесообразно определять по прошлой динамике соответствующих активов с учетом запланированной потребности на перспективу. При построении графика зависимости размера оборотных активов от времени целесообразно использовать квартальные данные, либо ежемесячные остатки элементов оборотных активов.

#### **Выбор стратегии формирования структуры источников финансирования спрогнозированной потребности в оборотных активах**

Завершающий этап политики управления оборотным капиталом компании заключается в выборе стратегии формирования структуры источников финансирования спрогнозированной потребности в оборотных активах.

В экономической литературе выделяют три стратегии финансирования оборотных активов компании: умеренную, агрессивную и консервативную. Умеренная стратегия финансирования оборотных активов основана на согласовании сроков функционирования активов организации и ее финансовых обязательств. На практике умеренная стратегия финансирования оборотных активов приводит к финансированию постоянных активов компании и постоянной части оборотных активов за счет долгосрочных обязательств и собственного капитала и резервов; переменная часть оборотных активов финансируется за счет краткосрочных обязательств компании. Агрессивная стратегия финансирования оборотных активов характеризуется финансированием постоянных активов компании и доли постоянной части оборотных активов за счет за счет долгосрочных обязательств и собственного капитала и резервов, а оставшуюся долю постоянной части оборотных активов и переменную часть оборотных активов компании – за счет краткосрочных обязательств. В случае использования консервативной стратегии финансирования оборотных активов компании постоянные активы, постоянная часть оборотных активов и доля переменной части оборотных активов компании финансируется за счет долгосрочных обязательств, а также собственного капитала и резервов; оставшаяся доля переменной части оборотных активов финансируется за счет краткосрочных обязательств. Стоимость финансирования в этом случае самая высокая, но финансовый риск минимизируется.

Стратегия финансирования оборотных активов компании оказывает непосредственное влияние на состав и структуру капитала. Нам представляется обязательным решение вопроса выбора определенной стратегии финансирования путем осуществления многовариантной оценки состава и структуры капитала компании. Расчет необходимо проводить по каждому рассматриваемому варианту привлекаемых в оборот собственных и заемных источников финансирования, а также необходимо каждый раз осуществлять прогноз финансовой устойчивости компании.

Представим графически наложение выбранного подхода к формированию оборотных активов компании и стратегии формирования источников финансирования запланированной потребности в оборотных активах.

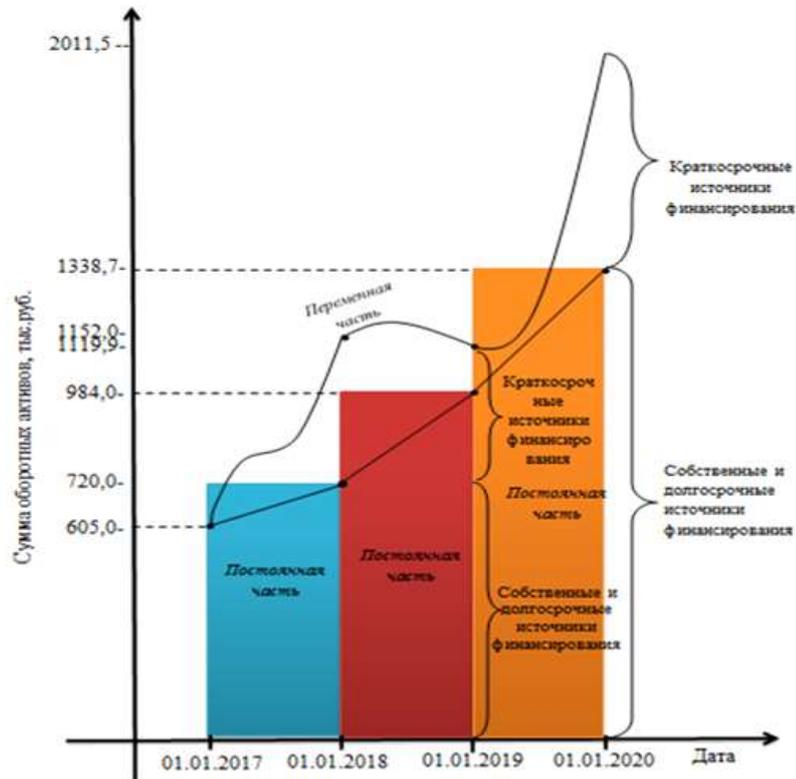


Рис. 1. Графическое представление объединения выбранного подхода к формированию оборотных активов компании и стратегии формирования источников финансирования запланированной потребности в оборотных активах

В левой части (рис. 1) в период с 1 января 2017 года по 1 января 2019 года представлен фактический размер оборотных активов компании; выделена постоянная и переменная часть рассматриваемых активов. На 1 января 2019 года скобками выделены группы фактических источников формирования оборотных активов компании. Оценивая состав и структуру сложившихся источников финансирования можно сказать, что организация проводила агрессивную политику формирования оборотного капитала до 1 января 2019 года. Используя рассматриваемую методику управления оборотным капиталом компании, мы определили запланированный объем оборотных активов в размере 2011,5 тыс. руб., руководствуясь консервативным подходом к формированию оборотных активов. Затем в ретроспективном периоде выделили постоянную и переменную часть оборотных активов компании и, определив тенденции их соотношения, выделили на рисунке соответствующие части оборотных активов в плановом периоде с 1 января 2019 года по 1 января 2020 года.

Проведенный анализ деловой активности компании и длительности финансового цикла повлиял на принятие решения в пользу выбора умеренной политики финансирования запланированной потребности в оборотных активах. На рисунке 1 состав и структура запланированных источников финансирования выделены скобками в правой части графика на 1 января 2020 года. Рассматриваемый вариант управления оборотным капиталом компании был выбран из нескольких групп расчетов в различном сочетании подходов к формированию оборотных активов компании и стратегий финансирования запланированной потребности в оборотных активах. На выбор управленческого решения повлияли наилучшие показатели ускорения оборачиваемости оборотных активов в сочетании с повышением финансовой устойчивости компании на перспективу.

Выбор показателя оборачиваемости оборотных активов, как основного при сравнении в различном сочетании подходов к формированию оборотных активов компании и стратегий финансирования запланированной потребности в оборотных активах, нам представляется очевидным и следует из самой экономической сущности оборотного капитала компании.

### **Заключение**

Работники финансовой службы компании ежедневно на практике реализуют роль оборотного капитала, заключающуюся в обеспечении непрерывности процесса производства и реализации продукции, услуг, поддерживают непрерывность кругооборота средств. При этом принятие управленческого решения финансовым менеджером осуществляется с учетом целей, стоящих перед бизнесом. Рассматриваемый комплекс мероприятий по управлению оборотным капиталом компании учитывает многовариантный состав целей ведения бизнеса: реализация каждого предлагаемого блока мероприятий позволяет максимально учитывать заданные цели развития компании. Такой подход к управлению оборотным капиталом и графическое наложение выбранного подхода к формированию оборотных активов компании и стратегии формирования источников финансирования запланированной потребности в оборотных активах выгодно отличает взгляд автора от действующих методик [8, с. 217–222], [9, с.60-63], [10, с. 337–340], [11, с. 230–231], [12–17].

В заключении хотелось бы подчеркнуть универсальность в использовании предложенного комплекса мероприятий по управлению оборотным капиталом для всех видов деятельности в экономике России.

### **Список литературы:**

1. Алексейчук А.В., Маркова Н.А. Оборотные средства и их функции в обеспечении непрерывности кругооборота капитала транспортных предприятий. Труды конгресса «Великие реки» 2019. Выпуск 8, 2019 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.вф-рекаморе.рф/2019/v2019\\_sek12.htm](http://www.вф-рекаморе.рф/2019/v2019_sek12.htm) (дата обращения: 21.01.2020).
2. Барнгольц С.Б. Оборотные средства промышленности СССР / С.Б. Барнгольц. – М.: Финансы, 1965. – 283 с.
3. Андреева С.Ю. Нормирование оборотных активов как средство управления оборотным капиталом предприятия / С.Ю. Андреева, Т.В. Ялялиева // Экономический анализ: теория и практика. – 2005. – № 9 (42). – С. 36–39.
4. Чалдаева Л.А. Управление оборотным капиталом в условиях транзитивной экономики / Л.А. Чалдаева // Финансы и кредит. – 2009. – № 17 (353). – С. 49–52.
5. Пионткевич Н.С. Управление оборотным капиталом организации: теория и методология / Н.С. Пионткевич // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2016. – № 2. – С. 19–26.
6. Назарова В.В. Взаимосвязь управления оборотным капиталом и результативности деятельности компании / В.В. Назарова, С.П. Глебов // Финансы: теория и практика. – 2018. – № 4 (106). – Том 22. – С. 114–129.
7. Волков Д.Л. Управление оборотным капиталом: анализ влияния финансового цикла на рентабельность и ликвидность компаний / Д.Л. Волков, Е.Д. Никулин // Вестник Санкт-Петербург-

ского университета. Менеджмент. – 2012. – № 2. – С. 3–32.

8. Воробьев А.В. Корпоративные финансы (водный транспорт) / А.В. Воробьев, В.Е. Леонтьев. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2016. – 328 с.

9. Красная Е.Н. Управление оборотным капиталом организации / Е.Н. Красная, Л.Т. Снитко. – М.: Издательство РДЛ, 2002. – 216 с.

10. Ковалев В.В. Финансовый анализ: Управление капиталом. Выбор инвестиций. Анализ отчетности / В.В. Ковалев. – 2-у изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 512 с.:ил.

11. Ван Хорн Дж. К. Основы управления финансами: Пер. с англ. / Гл. ред. Серии Я.В. Соколов. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 799 с.: ил. – (Серия по бухгалтерскому учету и аудиту).

12. Маркова Н.А. Совершенствование организации оборотных средств на эксплуатационных предприятиях речного транспорта: автореферат на соиск. уч. ст. канд. эконом. наук: 08.00.10. – Воен. фин.-экон. ун-т. – Нижний Новгород, 2003. – 25с.

13. Давыдова Л.В. Политика управления оборотным капиталом как часть общей финансовой стратегии предприятия / Л.В. Давыдова, С.А. Ильминская // Финансы и кредит. – 2006. – № 15 (219). – С. 5–11.

14. Дудин Н.М. Сущность и методы управления оборотным капиталом организации / Н.М. Дудин, Н.В. Лясников // Экономика и социум: современные модели развития. – 2014. – № 8-1. – С. 5–28.

15. Оптимизация структуры капитала для целей финансирования активов предприятий / В.П. Васильев, Б.Х. Озова, Ю.А. Тишина // Вестник академии знаний. – 2019. – № 6 (35). – С. 85–92.

16. Brealy R.A., Myers St.C., Marcus A.J. Fundamentals of Corporate Finance. – N.Y.: McGRAW-HILL, INC, 1995. – 655 p.

17. Brigham Eugene F. Fundamentals of Financial Management. Sixth Edition. – N.Y.: The Dryden Press, 1992. – 950 p.

## **COMPLEX OF MEASURES FOR MANAGING THE COMPANY'S WORKING CAPITAL**

**Nataliya A. Markova**

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

*Abstract. The company working capital ensures the products, works and services production and sale process continuity. At the stage of growing economy, effective working capital management allows businesses to achieve their goals with maximum efficiency and gain competitive advantages by accelerating the current assets turnover. The purpose of this article is to develop a comprehensive approach to managing the company's working capital. In order to achieve the stated goal, the existing methods of planning the need for the company's current assets were studied; a critical assessment of models for working capital management by Russian and foreign authors was carried out. The article presents a set of interrelated points for managing the company's working capital, including four consecutive stages. The scientific novelty of the study is to improve the methodology for planning the need for current assets of the company, based on rationing; developing and offering recommendations for the formation of insurance reserves in the context of current assets elements; justification of the current assets turnover indicator choice as the main one when comparing different combination of approaches to the company current assets formation and strategies for financing the planned need for current assets.*

*Recommendations for the insurance reserves formation in the context of current assets elements clarify the calculation of the need for current assets and nowadays allow to approach most closely to the current business conditions and meet the chosen approach to the formation of the company's current assets in this period in the best way. The graphical overlay of the chosen approach to the formation of the company assets circulating and forming the strategy of financing sources planned needs in the current assets underlines the relationship of the planned demand in current assets composition and the company capital structure within the chosen funding strategy. The management decision choice depends on the value of current assets turnover acceleration indicator combined with increasing the company financial stability in the future. The developed set of measures for managing the company's working capital is aimed at wide use by organizations in our country.*

Key words: *current assets, current assets formation policy, fixed and variable parts of current assets, current assets financing strategy, company working capital management.*

#### References:

1. Alekseychuk A.V., Markova N.A. Obоротnye sredstva i ih funkcii v obespechenii nepreryvности krugooborota kapitala transportnyh predpriyatij. V sbornike: Trudy kongressa «Velikie reki–2019». Web. 21 Jan.2020 < [http://www.вф-пека-море.рф/2019/v2019\\_сек12.htm](http://www.вф-пека-море.рф/2019/v2019_сек12.htm)>
2. Barngol'c S.B. Obоротnye sredstva promyshlennosti SSSR. M.: Finansy, 1965. 283 p
3. Andreeva S.Ju., T.V. Jaljalieva «Normirovanie oborotnyh aktivov kak sredstvo upravlenija oborotnym kapitalom predpriyatija» (Rationing of working assets as a means of managing the working capital of an enterprise) Ekonomicheskij analiz: teorija i praktika 9 (2005): 36–39.
4. Chaldaeva L.A. «Upravlenie oborotnym kapitalom v uslovijah tranzitivnoj ekonomiki» (Working capital management in the conditions of transitive economy) Finansy i kredit 17 (2009): 49–52.
5. Piontkевич N.S. «Upravlenie oborotnym kapitalom organizacii: teorija i metodologija» (Organization's working capital management: theory and methodology) Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Ekonomika i upravlenie 2 (2016): 19–26.
6. Nazarova V.V., S.P. Glebov «Vzaimosvjaz' upravlenija oborotnym kapitalom i rezul'tativnosti dejatel'nosti kompanii» Finansy: teorija i praktika 4 Tom 22 (2018): 114–129.
7. Volkov D.L., E.D. Nikulin «Upravlenie oborotnym kapitalom: analiz vlijanija finansovogo cikla na rentabel'nost' i likvidnost' kompanij» (Working capital management: analysis of the impact of the financial cycle on the company's profitability and liquidity) Vestnik Sankt–Peterburgskogo universiteta. Menedzhment 2 (2012): 3–32.
8. Vorob'ev A.V., V.E.Leont'ev Korporativnye finansy (vodnyj transport). N.Novgorod: Izd-vo FGBOU VO VGUVT, 2016. 328p
9. Krasnaja E.N., L.T. Snitko Upravlenie oborotnym kapitalom organizacii. M.: Izdatel'stvo RDL, 2002. 216p
10. Kovalev V.V. Finansovyj analiz: Upravlenie kapitalom. Vybor investicij. Analiz otchetnosti. 2-u izd., pererab. i dop. M.: Finansy i statistika, 2000. 512 p
11. Van Horne James C. Osnovy upravlenija finansami: Per. s angl. , Gl. red. Serii Ja.V. Sokolov. M.: Finansy i statistika, 1996. 799 p
12. Markova N.A. Sovershenstvovanie organizacii oborotnyh sredstv na jekspluatacionnyh predpriyatijah rechnogo transporta: avtoreferat na soisk. uch. st. kand. ekonom. nauk: 08.00.10. Voen. fin.-ekon. un-t. Nizhnij Novgorod, 2003. 25 p
13. Davydova L.V., S.A. Il'minskaja «Politika upravlenija oborotnym kapitalom kak chast' obshhej finansovoj strategii predpriyatija» (Working capital management policy as part of the company's overall financial strategy) Finansy i kredit 15 ( 2006): 5-11.
14. Dudin N.M., N.V. Ljasnikov «Sushhnost' i metody upravlenija oborotnym kapitalom organizacii» Ekonomika i socium: sovremennye modeli razvitiya 8 (2014): 5-28.
15. Vasil'ev V.P., B.H. Ozova, Ju.A. Tishina «Optimizacija struktury kapitala dlja celej finansirovanija aktivov predpriyatij» Vestnik akademii znaniy 6 (2019): 85-92.
16. Brealy R.A., Myers St.C., Marcus A.J. Fundamentals of Corporate Finance. N.Y.: McGRAW-HILL, INC, 1995. 655 p.
17. Brigham Eugene F. Fundamentals of Financial Management. Sixth Edition. N.Y.: The Dryden Press, 1992. 950 p

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

**Наталья Андреевна Маркова**, к.э.н., доцент кафедры бухгалтерского учета, анализа и финансов. «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»). 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: [masha.markovka@mail.ru](mailto:masha.markovka@mail.ru)

**Nataliya A. Markova**, Ph.D. in Economics, Associate Professor of the Department of Accounting, Analysis and Finance, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 03.01.2020 г.

## **Раздел IV**

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

---

## **Section IV**

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



УДК 627.15

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.44>

## ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СУТОЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА НИЗКОНАПОРНЫМ ГИДРОУЗЛОМ

С.О. Агеев

Федеральное бюджетное учреждение «Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей», г. Нижний Новгород, Россия  
e-mail: [gg6258@yandex.ru](mailto:gg6258@yandex.ru)

*Аннотация. В работе рассматриваются возможные проблемы для судоходства, которые могут возникнуть после строительства и ввода в эксплуатацию Нижегородского низконапорного гидроузла. Путем анализа имеющихся данных по изменению навигационных расходов через Нижегородскую гидроэлектростанцию и проведенного прогнозного расчета водного режима в створе создаваемого Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ) в работе выясняется, обеспечиваются ли судоходные габариты по глубине на участке выше и ниже створа ННГУ в течение навигационного периода, кроме того определяется проблема неравномерности сбрасываемых расходов с ННГЭС, которая будет сказываться на гидрологическом режиме нижнего бьефа ННГУ и на формировании русла этого участка реки. С целью решения данных проблем предлагается введение регулирования стока на водосливе ННГУ. Для определения возможности регулирования стока на водосливе ННГУ на базе лаборатории ВГУВТ ставится эксперимент, в ходе которого устанавливаются скоростные и временные параметры движения водного потока. В статье приводятся результаты проведенной работы.*

*Ключевые слова: неравномерность сбросов воды, расходы воды, транспортный попуск, гидрологический прогноз, кривая обеспеченности, регулирование стока, колебание уровней воды, нижний бьеф.*

### 1. Введение

Участок средней Волги Городец – Нижний Новгород остаётся незарегулированным, мелководным и значительно ограничивает транзитное судоходство и речные перевозки по Волге. Такая ситуация сложилась из-за частичного наполнения Чебоксарского водохранилища весной 1981 г. до промежуточной 63-й отметки. Решение этой проблемы путем дноуглубления мелководных участков приводит лишь к посадке уровней воды.

Реализация мероприятий по строительству Нижегородского низконапорного гидроузла предусмотрена Стратегией развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года, Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 года, федеральным проектом «Внутренние водные пути» Комплексного плана модернизации и расширения магистральной транспортной инфраструктуры на период до 2024 года в целях устранения инфраструктурного ограничения на лимитирующем участке Единой глубоководной системы и увеличения пропускной способности внутренних водных путей.

Створ ННГУ планируется расположить в 40,5 км ниже по течению от створа плотины Горьковского гидроузла в районе 890,5 км судового хода (рис. 1). В результате реализации проекта на Волге появятся два объекта: сам гидроузел и создаваемое им водохранилище. Водоохранилище на отметке нормального подпорного уровня (НПУ), равной 68,0 м, будет иметь емкость в 154 млн. м<sup>3</sup> и площадь водной поверхности 47,5 км<sup>2</sup> [1, 2]. Создаваемое низконапорным гидроузлом промежуточное водохранилище имеет небольшие размеры, планируется, что в нем вода будет накапливаться до

68-й отметки, а все что свыше - проходить транзитом в нижний бьеф (НБ). Таким образом, на участке реки: нижний бьеф Нижегородской ГЭС (НБ ННГЭС) - верхний бьеф ННГУ (ВБ ННГУ) будут обеспечены судоходные габариты по глубине.

Поскольку сбросы воды с Нижегородской ГЭС привязаны к целям энергетики, то имеется высокая неравномерность в значениях сбрасываемых расходов. Так, максимальные расходы воды в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла регистрировались в пределах от 1700 м<sup>3</sup>/с (1967 г.) до 7750 м<sup>3</sup>/с (1966 г.). Средний максимальный расход составил 4960 м<sup>3</sup>/с. В условиях регулирования стока в период летне-осенней межени среднесуточные расходы воды в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС изменялись от 753 м<sup>3</sup>/с (август 1973 г.) до 6160 м<sup>3</sup>/с (ноябрь 2012 г.), средний сбросной расход составил 1300 м<sup>3</sup>/с [2].

Опираясь на исследования Р.Д. Фролова, Шестовой М.В., др. ученых [3, 4] и представленные выше цифры, можно предположить, что с вводом в эксплуатацию ННГУ, в начальный период при наступлении половодья водохранилище довольно быстро можно наполнить до 68-й отметки, а дальше излишки воды будут проходить транзитом. Но потом наступает межень, и для обеспечения судоходных глубин в НБ ННГУ воды может не хватить.

Следующий очевидный факт - неравномерность попусков воды через турбины ГЭС приведёт к большому колебанию уровней в нижнем бьефе, и волна попуска значительно может повлиять на безопасность судоходства на акватории небольших размеров, к которой относится водохранилище, создаваемое Нижегородским низконапорным гидроузлом.

Кроме того, неравномерность сбрасываемых расходов с ННГЭС будет сказываться на гидрологическом режиме нижнего бьефа ННГУ и на формировании русла этого участка реки. И здесь нельзя исключить того, что можно получить условия для интенсивного переформирования дна реки ниже створа ННГУ. То есть, появится риск переместить участок с лимитирующими глубинами ниже по течению, в нижний бьеф ННГУ.



Рис. 1. Месторасположение створа ННГУ

## 2. Материалы и методы. Результаты

Чтобы выяснить, обеспечиваются ли судоходные габариты по глубине на участке ниже створа ННГУ в течение навигации, в работе [5] был выполнен расчет изменчи-

вости стока. При этом учитывалось, что транспортный попуск, исходя из соображений обеспечения уровней воды на нижерасположенном участке не менее проектных значений (для сверхмагистральной категории водного пути 99 % вероятности), установлен водохозяйственным расчетом [6] в размере 1140 м<sup>3</sup>/с.

Для примера были выбраны два характерных навигационных месяца 2017 года – май (высокие уровни - время прохождения половодья) и август (относительно низкие уровни - межень). Согласно своду правил [7] был проведен гидрологический прогноз по методу моментов (метод Фостера). В расчет закладывались среднесуточные величины сбрасываемых расходов с ННГЭС (при этом использовались данные генерации). В результате выяснилось, что на протяжении каждых суток, выбранных двух месяцев величина транспортного попуска в размере 1140 м<sup>3</sup>/с с необходимым процентом вероятности для рассматриваемых водных путей (99 %), не обеспечивается. Это иллюстрируют представленные графики изменения расходов воды во времени суток для различных процентов обеспеченности (рис. 2, 3), на которых нанесена линия, соответствующая величине транспортного попуска в 1140 м<sup>3</sup>/с. Как следствие полученного результата – это то, что гарантированная (проектная) глубина в нижнем бьефе ННГУ при отметке уровня воды в 64,37 м БС (при расходе 1140 м<sup>3</sup>/с) не обеспечивается, на что косвенно указывают расчеты в работе [6].

В период высоких вод (на примере мая) величина попуска не выдерживается в ночные и утренние часы для расходов высокой обеспеченности (90 - 99,9 % обеспеченности). В вечерние часы не выдерживаются только для расхода 99,9 % обеспеченности.

В межень период (на примере августа) не выдерживаются не только в ночные и утренние часы (для расходов 25 - 99,9 %), но и в вечерние, причем для расходов выше 60 % обеспеченности.

На формирование водного режима зарегулированного участка реки влияет очень много разнообразных факторов, их большая изменчивость во времени обуславливает серьезные трудности при прогнозировании. В данном конкретном случае имеется в виду нерегулярность сбросов во времени как в течение суток (ночью сбросы меньше), в течение недели (больше сбрасывается воды в рабочие дни), так и в течение года, когда весной в половодье или осенью в дождевой паводок накладывается увеличенный сток реки. Поэтому аналогичные расчеты были проведены для каждых суток каждого месяца навигационного периода (май - ноябрь) 2017 г. Полученные графики расходов различной обеспеченности, сбрасываемых ежедневно, показали схожую картину: гарантированные глубины для судоходства в НБ ННГУ обеспечиваются с 9.00 до 15.00 для любого процента вероятности превышения расхода, в остальное время суток периодически испытывается дефицит воды.

К такому же выводу можно прийти, проведя анализ расчетных параметров, связанных с максимальным и минимальным значениями уровней воды, суточной амплитудой колебаний уровней, максимальным и минимальным расходами воды для проектных условий при отметке уровня воды в водохранилище 68,0 м БС и в бытовом состоянии при среднесуточном расходе, сбрасываемом с ННГЭС, равном транспортному попуску 1140 м<sup>3</sup>/с [2]. В этой работе, выполненной в рамках разработки проектной документации для строительства ННГУ, приводятся расчетные характеристики расходов и уровней для 4-х створов, интересующих нас в нашем исследовании: 1) НБ ННГЭС, 2) ВБ ННГУ; 3) НБ ННГУ; 4) гидропост Нижний Новгород (г/п НН).

Результаты представлены ниже:

*– уровни воды (УВ) при проектных условиях в створах*

НБ ННГЭС на 1,15 ÷ 1,63 м выше бытовых,  
ВБ ННГУ на 3,05 ÷ 3,43 м выше бытовых,  
НБ ННГУ на 0,45 м выше ÷ 0,16 м ниже бытовых,  
г/п НН на 0,11 м выше ÷ 0,06 м ниже бытовых.

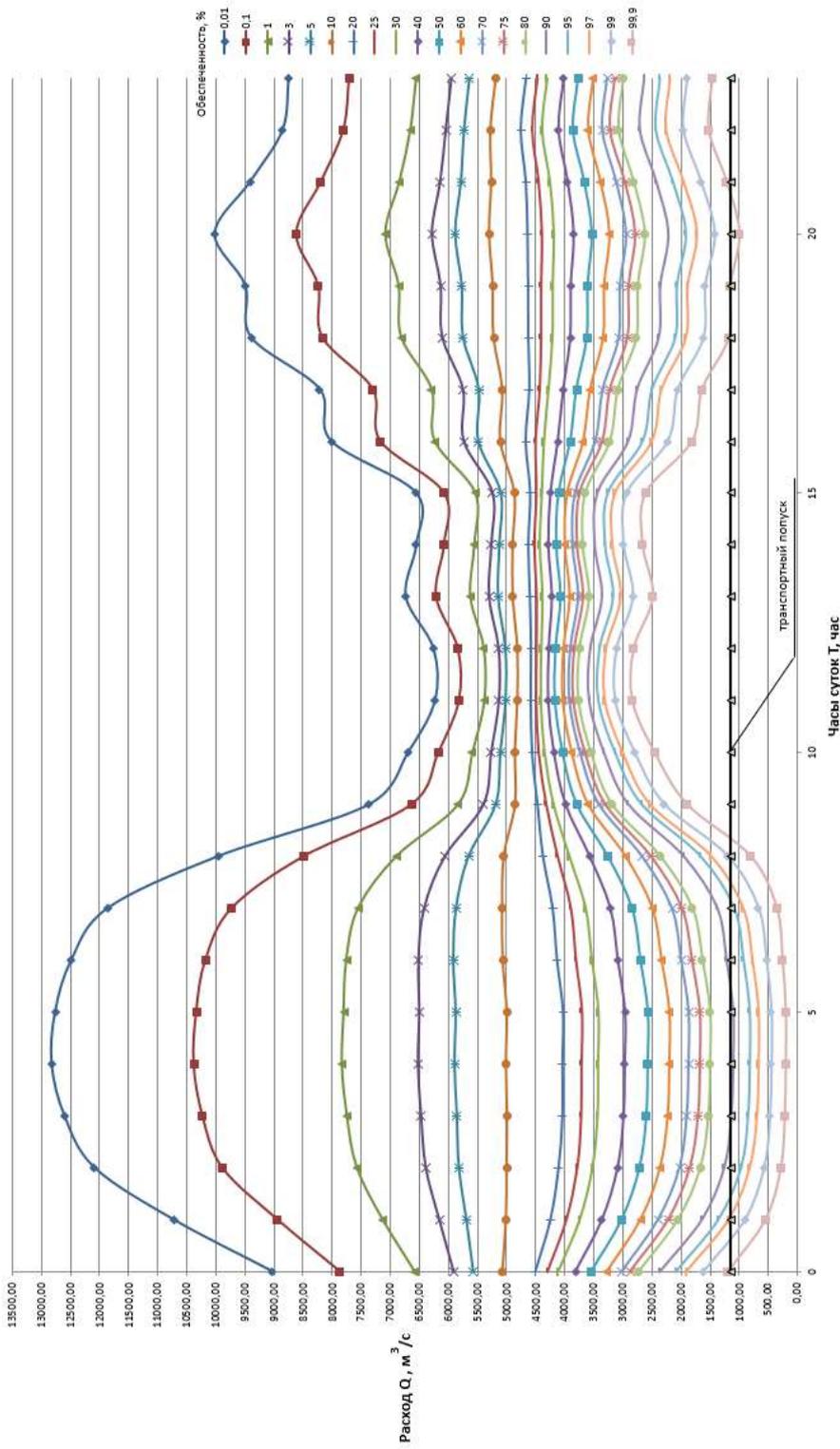


Рис. 2. Графики обеспеченности расходов воды (по часам) различной обеспеченности через ННГЭС в мае 2017 г.

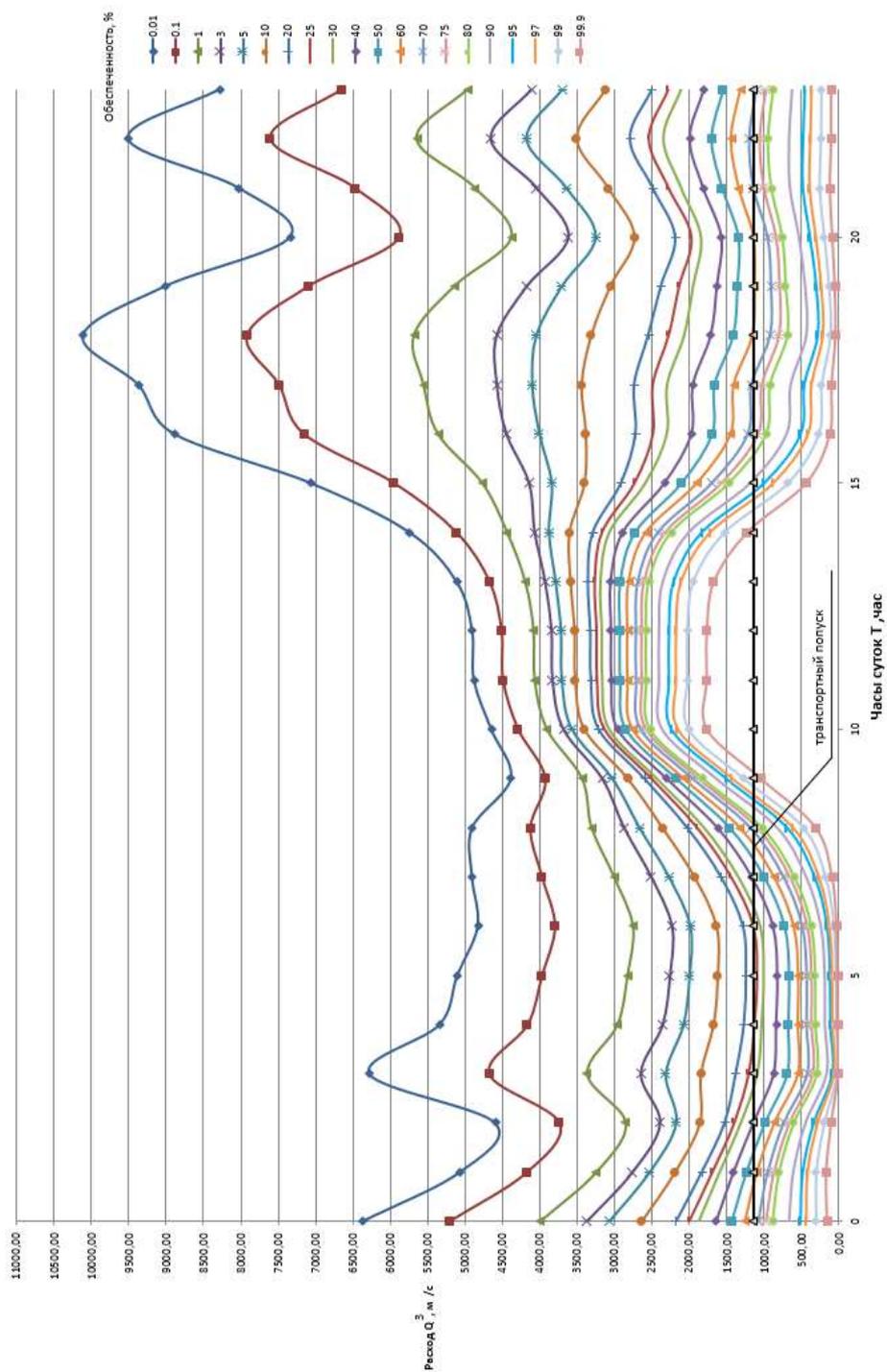


Рис. 3. Графики обеспеченности расходов воды (по часам) различной обеспеченности через ННГЭС в августе 2017 г



Вывод: создание ННГУ решает проблему повышения отметок воды (увеличения глубин) только на участке создаваемого водохранилища. На участке НБ ННГУ ÷ г/п НН, где сохраняется естественный речной сток, возможно дальнейшее снижение отметок УВ (уменьшение глубин);

– *суточная амплитуда колебаний уровней при проектных условиях в створах*

НБ ННГЭС на 0,48 м меньше бытовых,  
ВБ ННГУ на 0,38 м меньше бытовых,  
НБ ННГУ на 0,61 м выше бытовых,  
г/п НН на 0,17 м выше бытовых.

Вывод: на акватории создаваемого водохранилища амплитуда колебаний УВ снижается, чего не скажешь про участок реки, расположенного ниже ННГУ. В НБ ННГУ следует ожидать существенного увеличения амплитуды колебаний УВ, она несколько снизится у г/п НН;

– *расходы воды при проектных условиях в створах*

НБ ННГЭС не меняются,  
ВБ ННГУ на 597 м<sup>3</sup>/с больше ÷ 140 м<sup>3</sup>/с меньше бытовых,  
НБ ННГУ на 597 м<sup>3</sup>/с больше ÷ 140 м<sup>3</sup>/с меньше бытовых,  
г/п НН на 546 м<sup>3</sup>/с больше ÷ 143 м<sup>3</sup>/с меньше бытовых.

Вывод: создавая ННГУ, неравномерность сбрасываемых расходов сохраняется на всем исследуемом участке.

Это говорит о том, что поставленная цель по ликвидации лимитирующего участка в створах НБ ННГЭС ÷ ВБ ННГУ достигается, но вместе с тем, неравномерность сбросов в нижний бьеф ННГУ влечет за собой негативные последствия (высокие скорости, деформации русла и лимитирующие глубины уже в нижнем бьефе ННГУ), вплоть до Нижнего Новгорода.

Используя опыт эксплуатации подобных проблемных участков водных путей, для уменьшения негативной нагрузки на НБ ННГУ можно предложить вариант суточного регулирования водохранилищем, создаваемым низконапорным гидроузлом.

Чтобы выяснить, можно ли при ожидаемых гидрологических условиях на проектируемом гидроузле ввести суточное регулирование стока, проводится эксперимент на модели русловой площадки в лабораторных условиях (рис. 4) на базе гидротехнической лаборатории кафедры водных путей и гидротехнических сооружений ВГУВТ. Цель эксперимента заключается в том, чтобы оценить связь между подаваемыми расходами воды на входе площадки и величиной слоя воды, которые формируются над водосливом в конце площадки; проанализировать наблюдаемые скорости добегания волны от начального створа к конечному в зависимости от положений подвижной стенки водослива в конце площадки.



Рис. 4. Фото модели русловой площадки

Модель представляет собой участок русла реки (рис. 5). В начальном створе (вход на площадку) установлен водослив Томсона, в конечном створе (выход из нее) – водослив с тонкой стенкой, высоту которой можно регулировать, заглубляя её в паз. В ходе эксперимента определяются характеристики волны попуска: скорости распространения волны и время ее добегания до конечного створа; формирующийся при каждом опыте уклон свободной поверхности воды, создающийся напор на водосливе - высота слоя воды над порогом водослива.

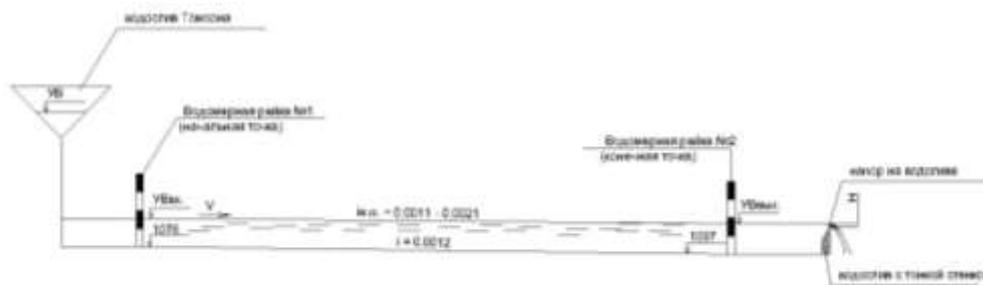


Рис. 5. Схема русловой площадки

Подаваемый расход на водослив Томсона определяется по формуле

$$Q_{\text{вх}} = mH_{\text{вх}}^{5/2} \text{tg}\theta \sqrt{2g}, \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент расхода водослива;  
 $H_{\text{вх}}$ , м – напор на водосливе;  
 $\theta$  – угол наклона боковой стенки;  
 $g$ , м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

На выходе модели расход рассчитывается по формуле водослива с тонкой стенкой

$$Q_{\text{вых}} = mb\sqrt{2g}H_{\text{вых}}^{3/2}, \quad (2)$$

где  $m$  – коэффициент расхода водослива;  
 $b$ , м – ширина водослива;  
 $H_{\text{вых}}$ , м – напор на водосливе с тонкой стенкой.

Результаты эксперимента представлены графиками зависимости средних скоростей добегания волны от подаваемых расходов на входе русловой площадки  $v = f(Q)$  и высоты слоя воды на водосливе от подаваемых расходов  $H_{\text{вых}} = f(Q)$ , рис. 6. Разным цветом показаны осредненные графики экспериментов для трех положений подвижной стенки водослива в конце площадки. Для каждого положения стенки проводилось по несколько опытов с различными значениями подаваемого расхода от меньшего значения к большему. Сначала стенка водослива была полностью утоплена в паз; затем – стенка водослива занимала промежуточное положение; дальше – стенка водослива была максимально поднята.

Как видно из рис. 6, график изменения скорости добегания волны для третьего эксперимента, когда стенка полностью поднята, имеет меньшие значения по сравнению с опытами, когда стенка полностью утоплена в паз или в промежуточном положении. При этом формирующийся напор на водосливе для всех трех опытов практически одинаково меняется в зависимости от подаваемого расхода.

Проведенные опыты показали достаточно тесную связь между подаваемым расходом на входе площадки  $Q$  и формирующимся напором на водосливе  $H_{\text{вых}}$  на выходе.

Полученные в ходе эксперимента данные подверглись корреляционному анализу по программе ФАКТОР [8], целью которого было выявление оценки силы связи между случайными величинами (признаками), которые характеризуют реальный процесс. Теснота связи между напором на водосливе на выходе  $H_{\text{вых}}$  и расходами воды на входе  $Q_{\text{вх}}$  очень сильная и оценивается коэффициентом корреляции 0,98.

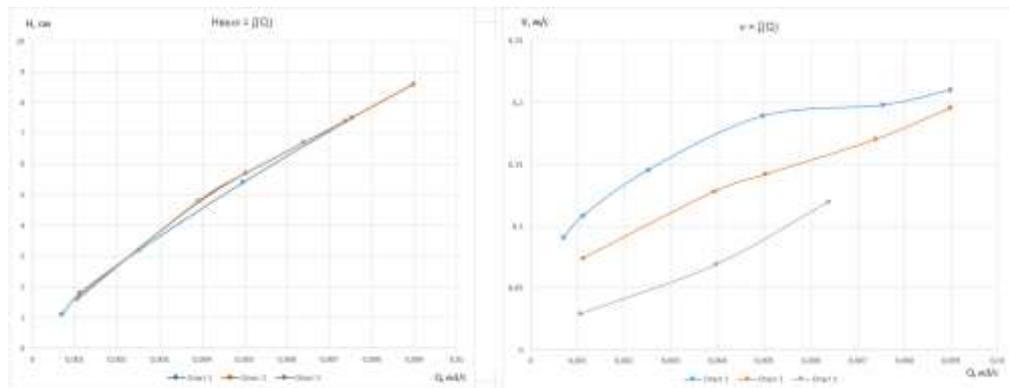


Рис. 6. Графики зависимости  $v=f(Q)$  и  $H_{\text{вых}}=f(Q)$

#### 4. Обсуждение

Все выше сказанное дает право говорить о том, что единственно возможное решение избежать получения лимитирующих глубин, сгладить неравномерность попусков с целью снижения скоростных характеристик потока и тем самым уменьшить негативную нагрузку на НБ ННГУ можно путем суточного регулирования воды на проектируемом гидроузле в навигационный период. Это сделать необходимо и возможно, поскольку проектируемый гидроузел «не завязан» на энергетике и воды можно сбрасывать столько, сколько этого требуют задачи судопропуска. Для этого требуется определиться с диапазоном расходов регулирования.

Водохозяйственными расчетами [6] установлено, что обеспеченность водохозяйственных показателей в вариантах до строительства низконапорного гидроузла и после его строительства отличаются незначительно, а анализ диспетчерских графиков работы водохранилища ННГУ показал, что при обеспеченности стока 1 – 75 % время на наполнение водохранилища не требуется, так как расходы, проходящие через створ ННГУ соответствуют уровням воды выше 68,0 отметки, и поэтому вся «лишняя вода» проходит транзитом. При больших обеспеченностях стока необходимо время на наполнение водохранилища, максимальное значение которого соответствует 20 сут. при 99 % обеспеченности. Максимальная продолжительность периода опорожнения составляет 10,5 дней при 99 % обеспеченности годового стока, а минимальная 4,6 дней при 1 % обеспеченности годового стока. Анализ показал, что расходы во времени имеют большой разброс.

Проработка путей реализации такого решения и является предметом дальнейшего исследования.

При таком режиме работы ННГУ гарантированные глубины в НБ ННГУ обеспечиваются только при транспортном попуске в  $1140 \text{ м}^3/\text{с}$ . Как показано выше, расход в НБ ННГУ не отвечает требованиям обеспечения транспортного попуска, но за счет введения в технологический процесс суточного регулирования может быть увеличен, причем вне зависимости от водности года. Суточное регулирование можно вести за счет кратковременного рационального увеличения объема воды в водохранилище ННГУ, что потребует некоторого кратковременного повышения уровня воды, например, на 0,5 м. В этом случае объем увеличится на  $23,4 \text{ млн. м}^3$  и соста-

вит 177,14 млн. м<sup>3</sup>.

### Заключение:

1. Проведенные на данном этапе исследования автора и анализ работ других ученых и проектировщиков подтверждают необходимость в регулировании расходов воды через водослив ННГУ. Оптимизация расходов воды на выходе может быть достигнута путем рационального усреднения входного гидрографа.

2. Оценка регулирующих возможностей водохранилища с отметкой НПУ, равной 68,0 м БС, показала возможную при определенных условиях нехватку воды в навигационный период для обеспечения судоходных глубин в НБ ННГУ.

3. Для определения в каком диапазоне расходов возможно проводить суточное регулирование в створе ННГУ, следует провести водно-балансовые расчеты создаваемого водохранилища при отметке НПУ, равной, например, 68,5 м БС, используя интегральные кривые стока. В дальнейшем, это поможет выработать методические подходы для расчета уровней воды в створе ННГУ при различных попусках через ННГЭС, и дальше – для подачи в НБ ННГУ возможно более равномерного расхода в течение суток, что положительно скажется на русловом и водном режиме нижнего бьефа. Эта задача осуществима путем разработки алгоритма маневрирования автоматическими затворами на водосливе ННГУ.

### Список литературы:

1. Агеев С.О. Анализ проблемных вопросов безопасности судоходства на участке Городец – Нижний Новгород до и после строительства Нижегородского низконапорного гидроузла / С.О. Агеев, М.А. Матюгин // Труды конгресса «Великие реки – 2017». Вып. 6. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с. 1–4.
2. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла. Этап проектных работ. Инженерно-гидрометеорологические изыскания. 153-038 / ННГУ-ИГИ.ИЗ. – ООО «Техтрансстрой». – Самара, 2018. – 178 с.
3. Фролов, Р.Д. Об улучшении судоходного состояния нижнего бьефа Нижегородской ГЭС на р. Волге // Труды Академии проблем водохозяйственных наук РФ «Проблемы русловедения». Вып. 9 / Р.Д. Фролов – М., 2003. – 186–194 с.
4. Шестова, М.В. Русловой режим нижнего бьефа Нижегородской ГЭС // Сборник трудов «Водные пути и гидротехнические сооружения», вып. 297 / М. В. Шестова. – Н. Новгород: ВГАВТ, 2001.
5. Агеев, С.О. Анализ изменений навигационных расходов через Нижегородскую ГЭС в навигацию 2017 года и рекомендации по улучшению водного режима участка р. Волги ниже створа Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ) / С.О. Агеев // Труды конгресса «Великие реки – 2018». Вып. 7. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2018. – с. 1–7.
6. Ситнов, А.Н. Обоснование параметров обеспеченности водохозяйственных балансов и режима работы водохранилища Нижегородского низконапорного гидроузла / А.Н. Ситнов, Н.В. Кочурова, Д.А. Мильцын // Вестник ВГАВТ. Вып. 50. – Н.Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с. 23–31.
7. СП 33-101.2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Одобрено постановлением Госстроя России №218 от 26.12.2003. – М., 2004. – 108 с.
8. Шихалев, А.М. Корреляционный анализ. Непараметрические методы: Учебно-методическое пособие / А.М. Шихалев. – Казань: Казан. ун-т, 2015. – 58 с.

## DRAIN REGULATION OF LOW-HEADED HYDRAULIC UNIT

**Sergey O. Ageev,**

*Administration of the Volga basin of inland waterways, 603001, Nizhniy Novgorod, Rozhdestvenskaya, 21 B, e-mail: gg6258@yandex.ru*

*Abstract. The article considers possible problems for shipping, which may arise after the construction and commissioning of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. By analyzing the available data on the change in navigation expenses through the Nizhny Novgorod hydroelectric power station and the predicted calculation of the water regime in the alignment of the created Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric system, it is ascertained in the article whether the navigable dimensions in depth are ensured in the section above and below the alignment of the NNSU during the navigation period. In order to determine the possibility of regulating runoff on a spillway of the Nizhny Novgorod State University, an experiment is set up at the Volga State University of Water Transport laboratory, during which the speed and time parameters of the water flow are established. The article presents the results of the work.*

*Key words: water discharges irregularity, water discharge, transport release, hydrological forecast, supply curve, flow regulation.*

#### **References:**

1. Ageev S.O., Matyugin M.A. «Analysis of the problematic issues of shipping safety on the Gorodets-Nizhny Novgorod section before and after the construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydraulic system» V sbornike: Trudy 19-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2017». Web. 07 Sep. 2019 < <http://www.вф-река-море.рф/>>
2. Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. Stage of design work. Hydrometeorological engineering surveys. 153-038 / NNGU-IGI. – LLC Tech-Transstroy. – Samara, 2018. 178 p.
3. Frolov, R.D. «On improving the navigable condition of the downstream of the Nizhny Novgorod hydroelectric station on the river. Volge», Proceedings of the Academy of Problems of Water Economics of the Russian Federation «Problems of the Russian Language». Vol. 9 / R.D. Frolov – M., 2003. –186–194 s.
4. Shestova, M.V. «The riverbed regime of the downstream of the Nizhny Novgorod hydroelectric station», Collection of works «Waterways and hydraulic structures», vol. 297 / M.V. Shestova. – N. Nov-Gorod: VGAVT, 2001.
5. Ageev, S.O. «Analysis of changes in navigation costs through the Nizhny Novgorod Hydroelectric Power Station in the navigation of 2017 and recommendations for improving the water regime of the r. Volga below the alignment of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex (NNSU)» V sbornike: Trudy 20-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2018».
6. Sitnov, A.N. «Substantiation of the parameters of the supply of water balances and the operation mode of the reservoir of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex» Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta 50 (2017): p. 23–31.
7. SP 33-101.2003. Determination of the main calculated hydrological characteristics. It is approved by the resolution of the Gosstroy of Russia No. 218 of 12/26/2003. – M., 2004. – 108 p.
8. Shikhalev, A.M. «Correlation analysis. Nonparametric methods: educational-methodical manual», Kazan: Kazan. Univ., (2015): 58 p.

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

**Сергей Олегович Агеев**, главный геолог (заместитель начальника) службы главного маркшейдера, Федеральное Бюджетное учреждение «Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей» (ФБУ «Администрация Волжского бассейна»), 603001, г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, 21 «Б»,  
e-mail: gg6258@yandex.ru

**Sergey O. Ageev**, Chief geologist (deputy chief) of the service of the chief surveyor, Administration of the Volga Basin, 21 «B», Rozhdestvenskaya st, Nizhniy Novgorod, 603001

Статья поступила в редакцию 06.02.2020 г.

УДК 656.62.052.4

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.45>

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОСАДКА ТОЛКАЕМЫХ СОСТАВОВ И ОСОБЕННОСТИ ЕЁ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**А.Н. Клементьев**

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

**М.Ю. Чурин**

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

**Е.В. Зубкова**

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

*Аннотация. В данной статье рассмотрен вопрос проявления динамической просадки толкаемых составов при следовании на мелководных участках водных путей. В статье проведен анализ ныне существующих и наиболее часто используемых методов определения величин динамической просадки толкаемых составов: метод В.Г. Павленко, метод А.М. Полунина, метод П.Н. Шанчурова, метод Г.И. Сухомела, метод доктора С.Б. Барросса, метод ВГАВТ. На базе выполненного сравнительного анализа существующих методов делаются выводы о предпочтении использования метода ВГАВТ для расчета величин динамической просадки толкаемых составов при следовании на мелководье как метода, позволяющего учитывать особенности формы корпуса толкаемых составов. В статье приводится формула расчета величин динамической просадки толкаемых составов, учитывающая особенности формирования современных толкаемых составов.*

*Ключевые слова: анализ, метод расчета, динамическая просадка, суда речного флота, толкаемые составы.*

В настоящее время вопрос обеспечения безопасной проводки судов речного флота и толкаемых составов на мелководных участках внутренних водных путей получил дополнительную значимость и актуальность. Это определяется ныне существующей устойчивой тенденцией увеличения размеров строящихся судов как внутреннего плавания, так и морских судов. Это в полной мере относится и к толкаемым составам новой постройки.

Расчет минимального запаса воды под днищем, допустимого для каждого конкретного участка мелководья, включает в себя учет целого ряда очень важных факторов, в числе которых необходимо отметить учет дополнительной просадки судна при следовании на мелководном участке. Это относится к речным судам в первую очередь исходя из их специфики работы. Судоводителям чисто речных судов большую часть эксплуатационного времени приходится работать в стесненных условиях мелководья рек и каналов.

Глубины, при которых начинает сказываться мелководье, определяются формулой [1]:

$$H_{\text{м}} \leq 4T_{\text{ср}} + \frac{3v^2}{g} \quad (1)$$

где  $H_{\text{м}}$  – глубина на мелководном участке, м;

$T_{\text{ср}}$  – средняя осадка судна или толкаемого состава, м;

$v$  – скорость судна или толкаемого состава, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Другим критерием, характеризующим влияние мелководного участка и определяющим изменение характера волнообразования, является число Фруда по глубине, зависящее от глубины в районе работы судна  $H$ , скорости  $v$  следования судна или толкаемого состава [2]

$$Fr_H = \frac{v}{\sqrt{gH}} \quad (2)$$

В своих работах А.Д. Гофман [3] подчеркивает, что «при движении судов со скоростями, соответствующими  $Fr_H < 0,6$  влиянием изменения характера волнообразования на гидродинамические силы и моменты, действующие на корпус судна, можно пренебречь. Приближение числа Фруда по глубине к единице сопровождается резким увеличением высоты судовой волны. Исходя из этого, в движение вовлекаются дополнительные массы жидкости, и волновое сопротивление возрастает по сравнению с движением на глубокой воде с той же скоростью. Вблизи бортов судна наблюдается понижение свободной поверхности, вследствие чего осадка судна увеличивается. Увеличение осадки судов и возникновение дифферента при движении на мелководье объясняются уменьшением давления воды под днищем корпуса судна. Это уменьшение является следствием увеличения скорости обтекания днища водой, а также трансформацией системы судовых волн при движении на мелководье» [4]. При этом требуется обратить внимание на тот факт, что в выражениях (1) и (2) под скоростью судна или толкаемого состава  $V$  подразумевается скорость судна или толкаемого состава относительно воды, что является очень важным.

Необходимо отметить, что для расчета величин динамической просадки судов на мелководье существует достаточное большое количество различных методов, разработанных как отечественными, так и зарубежными авторами. В тоже время для определения величин динамической просадки толкаемых составов, следующих на мелководье, выбор методов невелик. Рассмотрим методы расчета величин динамической просадки, разработанные для судов речного флота, которые могут быть использованы и для толкаемых составов на мелководье, более детально:

### 1. Метод В.Г. Павленко

Увеличение осадки по корме для речных судов и толкаемых составов В.Г. Павленко предложил вычислять по формуле» [5]:

$$\Delta T = \frac{av^2}{2g} \quad (3)$$

где  $\Delta T_k$  – величина увеличения осадки судна или толкаемого состав по корме, м;

$v$  – скорость судна или толкаемого состава, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$a$  – коэффициент, причем: для крупнотоннажных грузовых судов речного флота и толкаемых составов

$$a = 0,04 \left( 16,5 - \frac{L}{B} \right) \sqrt{\frac{T}{H}}, \quad (4)$$

где  $L$  – длина судна или толкаемого состава, м;

$B$  – ширина судна или толкаемого состава, м;

$T$  – осадка судна или толкаемого состава, м;

$H$  – глубина судового хода, м.

## 2. Метод А.М. Полунина

Метод разработан для судов средних размерений, осуществляющих работу на сибирских реках, дает хорошие результаты для расчета увеличения осадки по корме [6]:

а) для грузовых теплоходов средних габаритов

$$\Delta T_k = (0,04 + 0,35 \frac{T}{H}) \frac{v^2}{g}; \quad (5)$$

б) для пассажирских судов

$$\Delta T_k = a T_k \left( \frac{v}{\sqrt{g T_k}} \right)^b \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  – числовые коэффициенты, определяемые по выражениям:

$$a = 0,265 - 3,6 \frac{T}{H} + 11,3 \left( \frac{T}{H} \right)^2 - 8,5 \left( \frac{T}{H} \right)^3; \quad (7)$$

$$b = 0,526 - 18,6 \frac{T}{H} + 19,3 \left( \frac{T}{H} \right)^2 - 0,8 \left( \frac{T}{H} \right)^3 \quad (8)$$

Данные формулы дают положительные результаты в случае, если  $0,4 \leq \frac{T}{H} \leq 0,9$ .

## 3. Метод П.Н. Шанчурова

Для определения увеличения кормовой осадки винтовых и колесных судов речного флота П.Н. Шанчуровым предложены достаточно простые выражения [5]:

а) для соотношений  $\frac{H}{T} \leq 1,6$

$$\Delta T_k = 0,00135 \frac{kv^2}{g} \left( 16,43 - \frac{L}{B} \right) \sqrt{\frac{T}{H}} \quad (9)$$

б) для соотношений  $\frac{H}{T} \geq 1,6$

$$\Delta T_k = 0,00112 \frac{kv^2}{g} \left( 16,43 - \frac{L}{B} \right) \sqrt{\frac{T}{H}} \quad (10)$$

где  $k$  – коэффициент, принимаемый при  $5 < L/B < 7$  для винтовых судов речного флота 1,15, для колесных судов речного флота 1,10, при  $7 < L/B < 9$  для винтовых судов речного флота 1,10, для колесных судов речного флота 1,05;  
 $v$  – скорость судна или толкаемого состава (относительно берега), км/ч.

## 4. Метод Г.И. Сухомела

Методом Сухомела увеличение средней осадки на ходу определяется по выражениям [7]:

а) при соотношении  $\frac{H}{T} \leq 1,4$

$$\Delta T_{cp} = \frac{k^2 - 1}{2g} v^2 \quad (11)$$

б) при соотношении  $\frac{H}{T} > 1,4$

$$\Delta T_{cp} = \sqrt{\frac{T}{H}} \frac{k^2 - 1}{2g} v^2 \quad (12)$$

где  $\Delta T_{cp}$  – среднее увеличение осадки на ходу судна, м;  
 $k$  – коэффициент, определяемый по отношению  $L/B$  по таблице 1;  
 $v$  – скорость судна (относительно воды), м/с.

Таблица 1

**Зависимость коэффициента  $k$  от отношения длины и ширины судна**

$L/B$	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	12,0
$k$	1,32	1,27	1,23	1,19	1,17	1,15	1,10

Необходимо отметить, что с увеличением скорости возрастает дифферент (как правило, на корму), для расчета максимальной просадки величину средней просадки, определяемой по выражениям (11) и (12), необходимо умножить на коэффициент  $\alpha$ , величина которого определяется формой обводов судна и отношения длины к ширине. Этот коэффициент рассчитывается на базе проведенных натурных испытаний различных судов. Опытные данные показывают, что величина коэффициента  $\alpha$  для различных проектов судов может меняться в пределах 1,1–1,5 [8]. Увеличение осадки кормой рассчитывается с использованием выражения:

$$\Delta T_{\kappa} = \alpha \Delta T_{cp} \quad (13)$$

### 5. Метод доктора С.Б. Баррасса

В настоящее время на судах иностранных судовладельцев широкое использование получил метод доктора С.Б. Баррасса [12]. Этот метод расчета просадки морских судов получил одобрение Балтийского Ллойда. Метод позволяет рассчитать величины приращения осадки судов для двух видов мелководья. Для мелководных участков водных путей (открытые воды) С.Б. Баррасс предлагает использовать выражение:

$$\Delta T = \delta v^2 / 100, \quad (14)$$

где:  $\Delta T$  – величина приращения осадки судна (м);  
 $\delta$  – коэффициент полноты водоизмещения судна;  
 $v$  – скорость судна относительно масс воды (узлы).

Коэффициент общей полноты вычисляется из выражения:

$$\delta = V / L * b * T, \quad (15)$$

где:  $\delta$  – коэффициент общей полноты судна;  
 $V$  – водоизмещение судна на заданную осадку судна  $T$ ;  
 $L$  – длина судна (м);  
 $b$  – ширина судна (м);  
 $T$  – осадка судна (м).

Для стесненных условий плавания (каналов) С.Б. Барросс предлагает другое выражение для расчета величин увеличения просадки:

$$\Delta T = \delta v^2 / 50 \quad (16).$$

В каналах и в стесненных фарватерах сечение потока воды сужается корпусом судна. Соотношение сечения канала или стесненной узкости к проекции поперечного сечения подводной части корпуса судна называется коэффициентом загромождения русла канала ( $B_f$ ).

$$B_f = b T / B H \quad (17)$$

где  $B$  – ширина русла канала или стесненной узкости (м),  
 $H$  – глубина канала или стесненной узкости (м).



Рис. 1. Коэффициент загромождения русла канала

При известных размерах русла реки, вычисляется коэффициент загромождения. В этом случае для речных условий получил:

$$\Delta T = K \delta v^2 / 100 \quad (18)$$

$$\text{где } K = (6 B_f) + 0,40 \quad (19)$$

Приведенные формулы справедливы для значений коэффициент общей полноты судна  $\delta = 0,5-0,9$ . При этом С.Б. Баррасс утверждает, что в зависимости от значения коэффициента общей полноты судно без дифферента будет подвержено проседанию в большей степени той или иной оконечностью:

$\delta = 0,7$  – судно проседает всем корпусом;

$\delta < 0,7$  – судно проседает на корму;

$\delta > 0,7$  – судно проседает носом.

«У судна, имеющего дифферент на корму, проседание также будет на корму, при дифференте на нос, проседание также на нос. Эта же информация приводится в «Brown's Nautical Almanac» [13].»

Метод С.Б. Баррасса разрабатывался для морских судов, изначально может быть применим в довольно малом диапазоне отношения осадки судна к глубине мелководного участка судоходного пути от 0,7 до 0,9. Баррасс этот диапазон задает как отношение глубины к осадке судна  $H/T = 1,1-1,4$ . В формулах этого метода присутствуют габариты судна, а не раздельно габариты толкача и толкаемого состава.

Другими словами, метод Баррасса не дает возможности «определить значения скоростной просадки судна в зависимости от запаса воды под килем (глубины в районе следования судна), что является существенным недостатком предлагаемого метода» [9].

## 6. Метод ВГАВТ

Разработчики метода расчета динамической просадки судов речного флота, получившего в дальнейшем название ВГАВТ, [9] исходили из особенностей обтекания судового корпуса жидкостью, которые зависят не только от главных габаритов судна и отношения осадки судна к глубине в районе следования. В этом случае необходимо учитывать также форму корпуса судна, что позволяет определить среднюю динамическую просадку судна:

$$\Delta T_{cp} = \bar{\sigma} \frac{Bv^2}{Lg} \sqrt{\frac{T}{H}} = \bar{\sigma} B Fr^2 \sqrt{\frac{T}{H}} \quad (20)$$

где  $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_H}{\sigma_K}$  – отношение коэффициентов полноты носовой половины к коэффициенту

полноты кормовой половины диаметрального батокса корпуса судна, определяющее форму обводов судна;

$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$  – число Фруда [6,10].

Для расчета величины приращения осадки судов внутреннего плавания и смешанного «река-море» плавания по корме предлагается использовать формулу (15), при этом коэффициент  $\alpha$  принимается равным 1,2, тогда будем иметь:

$$\Delta T_{\kappa} = \alpha \bar{\sigma} \frac{Bv^2}{Lg} \sqrt{\frac{T}{H}} = \alpha \bar{\sigma} B Fr^2 \sqrt{\frac{T}{H}} \quad (21)$$

Проведя сравнительный анализ представленных методик расчета величин динамических просадок применительно к толкаемым составам, необходимо отметить, что только метод Павленко был разработан непосредственно для определения величины динамической просадки толкаемых составов. Во всех вышепредставленных выражениях присутствуют главные размерения одиночного судна, в то время как толкаемый состав состоит из двух судов: толкача и баржи, а в некоторых конкретных случаях из нескольких барж. Поэтому при выполнении расчетов была взята за основу ширина толкаемой баржи как более крупного элемента толкаемого состава.

Результаты выполненных расчетов величин динамической просадки толкаемого состава сведены в таблицы 1 и 2.

Необходимо отметить, что величины динамической просадки толкаемого состава, определенные с использованием метода В.Г. Павленко, существенно отличаются от величин просадки, рассчитанных по методам Г.И. Сухомела и А.М. Полунина. Причем полученные значения по методу В.Г. Павленко имеют расхождение на порядок со значениями, рассчитанными по методам других авторов, и лежат в пределах точности измерений этих величин.

Результаты расчетов величин динамической просадки судов речного флота, выполненные по методу ВГАВТ, содержатся в таблице 2. Таблица содержит результаты расчетов величин динамической просадки толкаемого состава по методу ВГАВТ с учетом днищевого подзора в районе крепления толкача к барже и без учета этого подзора.

Таблица 1

**Результаты расчетов величин динамической просадки толкаемого состава (толкач проект № Р153 мощность 1500 л.с.) и баржа (проект № 16800 грузоподъемность 2500–3000 т. Осадка толкаемого состава  $T=2,5$  м (как толкача, так и баржи)**

Отношение Т/Н	Величина увеличения осадки по корме, м					
	Средний ход толкаемого состава			Малый ход толкаемого состава		
	Метод В.Г. Павленко	Метод Г.И. Сухомела	Метод А.М. Полунина	Метод В.Г. Павленко	Метод Г.И. Сухомела	Метод А.М. Полунина
0,5	0,021	0,272	0,400	0,0060	0,121	0,178
0,6	0,025	0,298	0,465	0,0070	0,133	0,207
0,7	0,023	0,322	0,531	0,0076	0,143	0,236
0,8	0,027	0,385	0,591	0,0082	0,172	0,265
0,9	0,031	0,385	0,661	0,0086	0,172	0,294

Представленные результаты позволяют оценить важность учета этого подзора, а это является существенной особенностью толкаемого состава по сравнению с обычным речным судном. Наибольшая сходимость полученных величин динамической просадки, выполненных по методу ВГАВТ с учетом подзора, наблюдается с результатами расчетов, выполненных по методу П.Н. Шанчунова (при этом получив  $L/B > 9$ , выбрали  $k = 1,1$ ; используя в этом случае таблицу метода расчета Г.И. Сухомела).

Таблица 2

**Зависимость увеличения осадки по корме толкаемого состава от соотношения Т/Н и скорости хода толкаемого состава**

Соотношение Т/Н	Величина увеличения осадки по корме толкаемого состава, м					
	Средний ход толкаемого состава			Малый ход толкаемого состава		
	Метод П.Г. Шанчунов	Метод ВГАВТ (без подзора)	Метод ВГАВТ (с учетом подзора)	Метод П.Г. Шанчунов	Метод ВГАВТ (без подзора)	Метод ВГАВТ (с учетом подзора)
0,5	0,169	0,208	0,239	0,080	0,063	0,106
0,6	0,185	0,228	0,262	0,088	0,069	0,116
0,7	0,241	0,247	0,284	0,107	0,074	0,125
0,8	0,257	0,264	0,303	0,114	0,080	0,135
0,9	0,273	0,279	0,321	0,121	0,085	0,143

При проведении расчетов важной является и величина осадки судна как постоянно присутствующей величины во всех методах расчетов и определяющей значения величин просадки в зависимости от запаса воды под днищем судна или толкаемого состава при следовании на мелководье. Во всех методах указывается осадка судна. Однако на практике осадки буксира-толкача и баржи существенно отличаются. Выбираем из документа «Основные характеристики контактных составов и их близких аналогов» [11] вариант толкаемого состава буксиром того же проекта, как и в первых расчетах (см. таблицы 1 и 2).

Расчеты по методу ВГАВТ выполнены с учетом днищевого подзора в районе крепления буксира и баржи.

Расчеты для толкаемого состава с различными осадками толкача и баржи (толкач проекта 153 с осадкой  $T=2,50$  м, баржа проекта Р-1787 при полной загрузке  $T = 3,50$  м). Зависимость увеличения осадки по корме толкаемого состава от соотношения  $T/H$  и скорости хода толкаемого состава

Отношение $T/H$	Величина увеличения осадки по корме, м					
	Средний ход толкаемого состава			Малый ход толкаемого состава		
	Метод А.М. Полунина	Метод П.Н. Шанчуров	Метод ВГАВТ	Метод А.М. Полунина	Метод П.Н. Шанчуров	Метод ВГАВТ
0,5	0,401	0,145	0,248	0,178	0,063	0,110
0,6	0,466	0,154	0,272	0,207	0,068	0,121
0,7	0,531	0,200	0,294	0,236	0,089	0,130
0,8	0,596	0,214	0,314	0,265	0,095	0,140
0,9	0,661	0,227	0,333	0,294	0,101	0,148

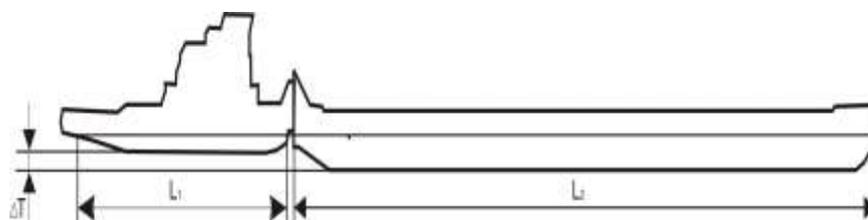


Рис. 1. Диаметральная плоскость толкаемого состава

Анализ полученных величин динамической просадки показывает, что величины просадки, рассчитанные по методу Полунина, имеют самые большие значения, а по методу П.Н. Шанчурова – наименьшие. Метод П.Н. Шанчурова имеет ограничения по отношению  $L/B$  (включает два диапазона от 5 до 7 и от 7 до 9. Для толкаемых составов это отношение может превышать 9). Расчеты с использованием метода ВГАВТ выполнялись с учетом днищевго подзора в районе крепления буксира к барже в то время, как другие методы эту особенность толкаемых составов не учитывают вообще.

Таблицы величин динамической просадки содержат данные приращения осадки по корме буксира. В случаях, когда буксир имеет меньшую осадку, чем у баржи, лимитирующей осадкой будет являться кормовая осадка баржи, которая также будет проседать.

В этом случае приращение кормовой осадки баржи может быть рассчитано с использованием следующего выражения:

$$\Delta T_{KB} = \Delta T_K - \frac{2(\Delta T_K L_T)}{L_B + L_T} \quad (16)$$

где:  $\Delta T_{KB}$  – приращение осадки на корме толкаемой баржи;

$\Delta T_K$  – величина динамической просадки на корме толкаемого состава; (приращение осадки на корме буксира) (по формуле 21);

$L_B$  – длина баржи;

$L_T$  – длина буксита-толкача.

#### Список литературы:

1. Управление судном и его техническая эксплуатация: Учебник для учащихся судоводит. спец. высш. инж. мор. училищ / Е.И Жуков [и др.]; под ред. А.И. Щетиной. – М.: Транспорт, 1983.

– 655 с.

2. Шанчуров П.Н. Управление судами и составами на внутренних водных путях: учебник для ин-тов водн. трансп. / П.Н. Шанчуров. М.: Транспорт, 1966.– 272 с.
3. Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания / А.Д. Гофман. – Л.: «Судостроение», 1971.– 256 с.
4. Шанчуров П.Н. Управление судами и составами: учебник для ин-тов водн. трансп. / П.Н. Шанчуров. М.: Транспорт, 1971.– 352 с.
5. Управление судами и составами: учебник для вузов / Н.Ф. Соларев [и др.]–2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 296 с.
6. Ходкость и управляемость судов: учебник В.Ф. Бавин [и др.]; утв. Управл. Кадров и учеб. заведений МРФ РСФСР для студ. ин-тов водн. тр-та; под ред. В.Г. Павленко. – М.: Транспорт, 1991.– 455 с.
7. Сухомел, Г.И. Исследование движения судов по каналам и мелководью / Г.И. Сухомел. – Киев «Наукова думка», 1966. – 80 с.
8. Сухомел Г.И. Исследование движения судов по ограниченным фарватерам /Г.И. Сухомел, В.М. Засс, Л.И. Янковский. – Киев: Из-во АН Украинской ССР, 1956.– 163 с.
9. Чурин М.Ю. Метод определения динамической просадки судов смешанного «река-море» плавания / М.Ю. Чурин //Современные проблемы науки и образования Выпуск 3, 2013. URL: [www.science-education.ru/111-10228](http://www.science-education.ru/111-10228).
10. Тихонов В.И. Волнообразование и волновое сопротивление / В.И. Тихонов //Судовождение и безопасность плавания, водные пути, гидротехнические сооружения и экологическая безопасность судоходства: сб. науч. тр./ ВГАВТ. – Н.Новгород: ФГОУ ВПР ВГАВТ, 2006. – с. 28–33.
11. Типовые схемы формирования составов в границах Волжского бассейна – Н. Новгород: ГУ Волжское ГБУ, 2003. – 22 с.
12. «Ship Design and Performance for Masters and Mates» С.В. Barrass [Электронный ресурс] – Режим доступа : [seatracker.ru >viewtopic.php? t=1735](http://seatracker.ru/viewtopic.php?t=1735)
13. Brown's Nautical Almanac / Brown, Son and Ferguson. Ltd. – Glasgow, G41 2SD, 2015.

## PUSHING VESSELS DYNAMIC SQUAT AND PECULIARITIES OF ITS CALCULATION

**Aleksandr N. Klement'ev,**

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

**Michael Y. Churin,**

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

**Evgeny V. Zubkova,**

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

*Abstract. In the article the question concerning the dynamic squat manifestation on pushing vessel in the shallow water condition is examined. In the article existing methods of dynamic squat calculating for pushing compound analysis is carried out, for instance: V.Pavlenko's method, A.Polunin's method, P. Shanchurov's method, G. Suhomel's method, doctor C. Barross's method, Volga State University of Water Transport method. Basing on the existing methods analysis we came to the conclusion of using Volga State University of Water Transport method. The method helps to calculate the pushing vessels dynamic squat, it also considers the pushing vessels hull's shape. In the article the pushing vessels dynamic squat calculation formula considering the pushing vessels formation peculiarities is presented.*

*Keywords: analysis, method of calculating, dynamic squat, river fleet ships, pushing compound.*

### References:

1. Управление судном и его техническая эксплуатация: Учебник для учащихся судоводит. спets. высш. инж. мор. училищ / Е.И. Жуков [и др.]; под ред. А. И. Шchetinoy. – М.: Транспорт, 1983. – 655с.

2. Shanchurov, P.N. Upravlenie sudami i sostavami na vnutrennikh vodnykh putyakh: uchebnyk dlya in-tov vodn. transp. / P.N. Shanchurov. M.: Transport, 1966.– 272 s.
3. Gofman, A.D. Teoriya i raschet povorotlivosti sudov vnutrennego plavaniya / A.D. Gofman. – L.: «Sudostroenie», 1971.– 256 s.
4. Shanchurov, P.N. Upravlenie sudami i sostavami: uchebnyk dlya in-tov vodn. transp. / P.N. Shanchurov. M.: Transport, 1971.– 352 s.
5. Upravlenie sudami i sostavami: uchebnyk dlya vuzov / N.F. Solarev [i dr.]–2-e izd., pererab. i dop. – M.: Transport, 1983. – 296s.
6. Khodkost' i upravlyaesost' sudov: uchebnyk V.F. Bavin [i dr.]; utv. Upravl. Kadrov i ucheb. zavedeniy MRF RSFSR dlya stud. in-tov vodn. tr-ta; pod red. V.G. Pavlenko. – M.: Transport, 1991.– 455s.
7. Sukhomel, G.I. Issledovanie dvizheniya sudov po kanalam i melkovod'yu / G.I. Sukhomel. – Kiev «Naukova dumka», 1966. – 80s.
8. Sukhomel, G.I. Issledovanie dvizheniya sudov po ogranichennym farvateram /G.I. Sukhomel, V.M. Zass, L.I. Yankovskiy. – Kiev: Iz-vo AN Ukrainskoy SSR, 1956.– 163s.
9. Churin M.Yu. Metod opredeleniya dinamicheskoy prosadki sudov smeshannogo «reka-more» plavaniya / M.Yu. Churin //Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya Vypusk 3, 2013. URL: [www.science-education.ru/111-10228](http://www.science-education.ru/111-10228).
10. Tikhonov, V.I. Volnoobrazovanie i volnovoe soprotivlenie / V.I. Tikhonov //Sudovozhdenie i bezopasnost' plavaniya, vodnye puti, gidrotekhnicheskie sooruzheniya i ekologicheskaya bezopasnost' sudokhodstva: sb. nauch. tr./ VGAVT. – N.Novgorod: FGOU VPR VGAVT, 2006. – s. 28–33.
11. Tipovye skhemy formirovaniya sostavov v granitsakh Volzhskogo basseyna – N. Novgorod: GU Volzhskoe GBU, 2003. – 22s.
12. «Ship Design and Performance for Masters and Mates» C. B. Barrass [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa : [seatracker.ru >viewtopic.php? t=1735](http://seatracker.ru/viewtopic.php?t=1735)
13. Brown's Nautical Almanac / Brown, Son and Ferguson. Ltd. – Glasgow, G41 2SD, 2015.

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

**Александр Николаевич Клементьев**, д.т.н., профессор, профессор 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](mailto:sudovod@vgavt-nn.ru)

**Михаил Юрьевич Чури**, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [suf@vgavt-nn.ru](mailto:suf@vgavt-nn.ru)

**Евгения Владимировна Зубкова**, аспирант кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [sudovod@vsawt.com](mailto:sudovod@vsawt.com)

**Aleksandr N. Klement'ev**, Doctor of engineering, professor. Professor of Navigation and Safety Navigation chain, Department of Navigation, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Michael Y. Churin**, Candidate of technical Sciences, docent. Performance of Navigation and Safety Navigation chain's manager, Department of Navigation, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Evgeny V. Zubkova**, Graduate student of Navigation and Safety Navigation chain, Department of Navigation, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 24.12.2019 г.

## **Раздел V**

**Эксплуатация судового  
энергетического оборудования**



## **Section V**

***Operation of ship power equipment***



УДК 629.5.03:621.43.068-021.465

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.46>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ

**Н.Н. Горлова**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
г. Барнаул, Алтайский край, Россия*

*Аннотация: среди используемых методов наиболее эффективным, с точки зрения качества очистки от основных вредных веществ, является каталитическая нейтрализация. Результативность использования данного метода во многом определяется свойствами и характеристиками используемого каталитического материала. Подбор соответствующего состава предопределяет обеспечение физических, физико-механических и коррозионных свойств используемых каталитических материалов. В связи с этим были изучены возможности использования окалина стали и формовочной глины в качестве базовых компонентов в шихте материала. С целью снижения стоимости системы очистки рассмотрена возможность замещения ценных дорогих компонентов размолами руд соответствующего состава.*

*В результате проведенных исследований был определен оптимальный качественный и количественный состав шихты каталитического материала.*

*Ключевые слова: суда, энергетические установки, оксиды серы, оксиды азота, каталитическая нейтрализация, пористые материалы.*

### Введение

Эксплуатация судовых энергетических установок (СЭУ) в настоящее время связана с интенсивным воздействием их на атмосферу, водные объекты и сушу, т.к. выбрасываемые отработавшие газы судовых дизелей, содержащие более 100 веществ и соединений, обладают разной степенью агрессивности.

Все используемые методы очистки отработавших газов можно разделить на группы, характеризующиеся различной степенью очистки от вредных веществ отработавших газов СЭУ: абсорбция, жидкостная нейтрализация, пламенная нейтрализация (термическая), эжекционно-пламенное дожигание, каталитическая нейтрализация, термокаталитическая нейтрализация (кипящий слой), подача воздуха в выпускной трубопровод, антидымные электрофильтры, антидымные фильтры из синтетических материалов, фильтрующие элементы из керамики с пропиткой или нанесением катализатора, дожигание в выпускном коллекторе [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Среди перечисленных выше методов, одним из перспективных и наиболее эффективных, является метод каталитической нейтрализации с использованием пористых проницаемых каталитических материалов. Он позволяет осуществлять комплексную очистку от твердых частиц, углеводородов, оксидов углерода, азота, серы в пределах 20...90% в зависимости от исходной концентрации вредных веществ. Такой результат во многом достигается за счет особых свойств используемых каталитических материалов, таких как пористость, извилистость, проницаемость и др. Получение таких материалов стало возможным в результате открытия процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [7, 8, 9].

Особенность процесса СВС заключается в том, что для его реализации необходимы минимальные энергозатраты; возможность получения более чистых конечных продуктов в результате высокой температуры протекания процесса и выгорания при этом летучих примесей; использование простого технологического оборудования;

затрачиваемое время на процесс значительно меньше по сравнению с другими методами; возможность получения современных материалов с заданными свойствами с использованием более дешевого сырья и в меньших количествах.

Кроме того, следует отметить экологический аспект использования СВС, заключающийся в снижении выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и простоте переработки твердых отходов вследствие особенностей самого процесса.

Получение пористых проницаемых СВС-каталитических материалов с определенным набором физических характеристик, физико-механических и функциональных свойств, связано с подбором покомпонентного состава шихты каталитического материала [10].

При этом важным является вопрос получения экономически эффективного и технологически приемлемого каталитического материала, позволяющего сократить затраты на его производство и эксплуатацию.

### **Материалы и методы**

В качестве основного компонента была изучена возможность использования окалины стали для получения пористых проницаемых СВС-каталитических материалов. С целью обеспечения необходимых свойств в состав шихты добавляется родий, иридий, медь в виде очищенных от примесей компонентов, но это приводит к значительному удорожанию получаемого каталитического материала [11].

В качестве варианта сокращения использования дорогих чистых компонентов рассмотрена возможность их замещения формовочной глиной. В своем составе она содержит комплекс элементов, позволяющих не только обеспечить эффективность протекания процесса СВС, но и обеспечить соответствующие для системы очистки отработавших газов характеристики

С целью оценки целесообразности использования в составе шихты окалины легированной стали и формовочной глины был проведен ряд исследований по изучению динамики изменения свойств каталитического материала от изменения покомпонентного состава шихты [12,13].

Поскольку основной целью использования изучаемых каталитических материалов является очистка отработавших газов судовых энергетических установок от твердых частиц и оксидов углерода, азота и серы, в качестве приоритетных были определены следующие свойства и характеристики материала: средний приведенный диаметр пор, пористость, извилистость, механическая прочность при сжатии и на изгиб, ударная вязкость.

### **Результаты**

В результате проведенного комплекса экспериментальных исследований были выявлены следующие закономерности. Исследуемые составы материалов в пределах изучаемых концентраций основных компонентов шихты (на основе окалины стали и формовочной глины), с увеличением концентрации базовых компонентов позволяют обеспечить:

- средний приведенный диаметр пор в интервале 177...112 мкм и 172...119 мкм для составов на основе окалины стали и формовочной глины соответственно;
- извилистость: 1,12...1,35 для состава с окалиной стали и 1,22...1,45 для состава на основе формовочной глины;
- пористость: 0,47...0,29 для состава с окалиной стали и 0,45...0,27 для состава на основе формовочной глины;
- механическая прочность при сжатии (МПа): 13,8...6,7 для состава с окалиной стали и 8,5...5,6 для состава на основе формовочной глины;
- механическая прочность при изгибе (МПа): 3,7...2,9 для состава с окалиной стали и 2,9...2,3 для состава на основе формовочной глины;

– ударная вязкость ( $\text{Дж/м}^2$ ): 0,31...0,151 для состава с окалиной стали и 0,24...0,105 для состава на основе формовочной глины.

Выбор используемых материалов должен быть основан на оптимальном соотношении физических характеристик и физико-механических свойств.

Особенностью эксплуатации СЭУ является использование дизельного топлива с содержанием серы в интервале 0,5...0,001% в условиях повышенной влажности воздуха, что в свою очередь ведет к образованию смеси кислот (азотной и серной).

В реальных условиях эксплуатации при очистке отработавших газов судовых дизелей на используемые каталитические материалы оказывают воздействие: изменение температуры окружающей среды, обводненная смесь азотной и серной кислот, а также скорость потока отработавшего газа до 9 м/с и температуры (порядка 700 К).

В результате этого создаются условия для возникновения процесса коррозии, влекущего за собой ухудшение физических характеристик, физико-механических и функциональных свойств используемых каталитических материалов и всей системы очистки.

С целью оценки степени воздействия агрессивных факторов внешней среды и условий эксплуатации были проведены исследования по подбору компонентов шихты и их соотношения для получения пористых проницаемых СВС-каталитических материалов.

В реальных условиях эксплуатации СЭУ актуальным является использование такого каталитического нейтрализатора, материал которого обеспечивает не только оптимальную очистку отработавших газов от вредных веществ, но является устойчивым к воздействию агрессивных условий среды их эксплуатации.

В связи с этим возникла необходимость подбора состава, соответствующего всем вышеприведенным параметрам, свойствам и характеристикам, а также обладающего устойчивостью к воздействию агрессивных факторов внешней среды и условий эксплуатации [14].

Были проведены исследования по оценке целесообразности замещения ценных чистых компонентов размолами соответствующих руд.

Привлекательность получаемого состава заключается в следующем: руда в своем составе содержит необходимые по качественному и количественному составу элементы для получения пористого проницаемого СВС-каталитического материала, что позволяет значительно сократить затраты на получения целевого материала.

В связи с этим предварительно были проведены исследования по изучению возможности использования руды бастнезит, монацит, лопарит, кордиерит, эвксенит, цеолит, ильменит в качестве базовых компонентов в шихте каталитического материала.

Основные физические характеристики и физико-механические свойства изученных составов на основе размолы руд приведены в табл. 1.

В качестве альтернативного был выбран состав материала на основе руды ильменит, привлекательность применения которого при получении пористых проницаемых каталитических материалах состоит в том, что отпадает необходимость во введении ряда чистых компонентов в шихту отдельно. Ильменит представляет собой титанистый железняк, уже содержащий  $\text{FeTiO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , Al и другие компоненты, на базе которых возможно получение скелетной структуры пористого проницаемого каталитического материала.

В рассматриваемой системе железо вступает в СВС-процессах как скелетообразующий материал, содержание в шихте по массе доходит до 47,5 % [15], что является достаточным для протекания процесса СВС.

С целью выявления устойчивости каталитических материалов, используемых в системе очистки отработавших газов СЭУ (на примере 6Ч15/18 на номинальном режиме), к воздействию агрессивных факторов внешних агрессивных условий эксплуатации, проведены дополнительные исследования.

Таблица 1

**Основные физические характеристики и физико-механические свойства изученных составов на основе размола руд**

Материалы с размолами руд	Физические характеристики			Физико-механические свойства		
	Средний приведенный диаметр пор, мкм	Пористость	Извилистость	Механическая прочность при сжатии, МПа	Механическая прочность при изгибе, МПа	Ударная вязкость, Дж/м <sup>2</sup>
Бастнезит	152	0,580	1,27	5,70	4,20	0,234
Монацит	168	0,550	1,32	4,50	3,50	0,235
Лопарит	178	0,650	1,37	5,20	5,00	0,243
Кордиерит	160	0,460	1,24	8,60	2,50	0,270
Эвксенит	179	0,594	1,33	3,79	2,84	0,219
Цеолит	147	0,580	1,30	4,90	4,20	0,231
Ильменит	158	0,475	1,21	11,30	3,00	0,275

Результаты исследования потери массы каталитического материала в смеси кислот (азотной и серной) по исследуемым материалам, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Потеря массы в смеси кислот (азотной и серной), %**

Состав материала	Потеря массы в смеси кислот (Кск), %
На основе окалины легированной стали	11,74–17,26
На основе формовочной глины	11,75–19,24
На основе руды ильменит	14,32–10,05

Дополнительно был проведен комплекс экспериментальных исследований по определению зависимости степени очистки отработавших газов (от оксидов азота и серы) от содержания базового компонента в составе шихты каталитического материала и потери массы в смеси кислот.

Результаты проведенных исследований представлены графически на рис. 1–6.

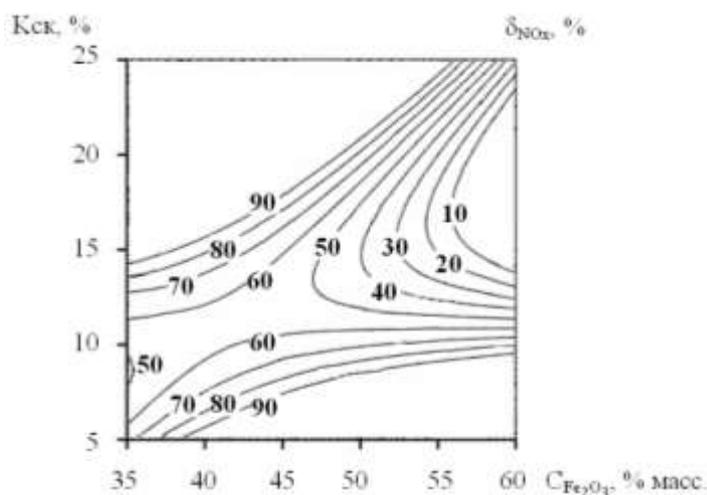


Рис. 1. Зависимость степени очистки от оксида азота ( $\delta_{NOx}$ ) от состава каталитического материала (ОС) и потери массы в смеси кислот (Кск)

### Обсуждение

Ранее в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени очистки от оксида азота, от состава каталитического материала на основе окалины стали ( $C_{Fe_2O_3}$ ) и потери массы в смеси кислот.

Выявленные зависимости были описаны следующим выражением:

$$\delta_{NO_x} = -279,908 + 12,486903C_{Fe_2O_3} + 14,643701K_{CK} - 0,005550C_{Fe_2O_3}^2 + 1,353191K_{CK}^2 - 1,086307C_{Fe_2O_3}K_{CK}, \quad \% \quad (1)$$

Увеличение базового компонента в составе шихты на основе окалины стали (от 11,74 до 17,26% по массе) значительным образом сказывается на потере массы материала в смеси кислот. При этом степень очистки от оксидов азота изменяется от 60 до 16%. Оптимальное обеспечение всех свойств достигается при содержании окалины стали 47,82% по массе. Такой состав позволяет обеспечить степень очистки от оксидов азота на уровне 50%, при этом потеря массы в смеси кислот составляет 13,30%.

Ранее в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени очистки от оксида азота от состава каталитического материала на основе формовочной глины ( $C_{ФГ}$ ) и потери массы в смеси кислот. Выявленные зависимости были описаны следующим выражением и являются принципиально новыми:

$$\delta_{NO_x} = 359,704 - 12,330804C_{ФГ} + 14,188037K_{CK} + 0,142194C_{ФГ}^2 + 0,308851K_{CK}^2 - 0,432239C_{ФГ}K_{CK}, \quad \% \quad (2)$$

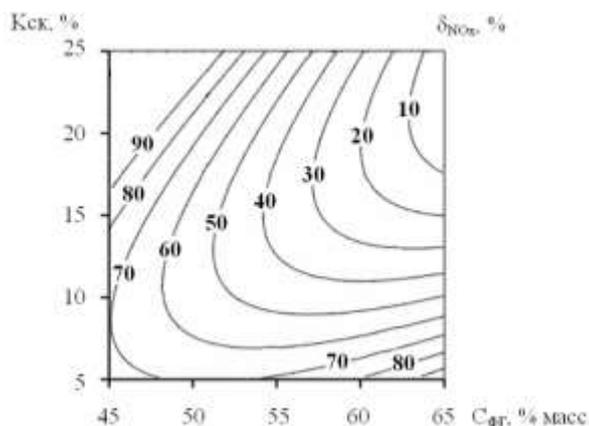


Рис. 2. Зависимость степени очистки от оксида азота ( $\delta_{NO_x}$ ) от состава каталитического материала (ФГ) и потери массы в смеси кислот ( $K_{CK}$ )

Аналогичная тенденция наблюдается при содержании формовочной глины в составе шихты каталитического материала и изменению потери массы материала в смеси кислот и степени очистки от оксидов азота. Однако, при оптимальном содержании базового компонента (формовочной глины) на уровне 56,30% по массе потеря массы в смеси кислот составит 14,12 %, а степень очистки — 37%.

Ранее в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени очистки от оксида азота от состава каталитического материала на основе руды ильменит ( $C_{ИЛ}$ ) и потери массы в смеси кислот. Выявленные зависимости были описаны следующим выражением и являются принципиально новыми:

$$\delta_{NO_x} = -551,443 + 10,943292C_{ИЛ} + 36,100956K_{CK} - 0,044638C_{ИЛ}^2 - 0,640188K_{CK}^2 - 0,341625C_{ИЛ}K_{CK}, \quad \% \quad (3)$$

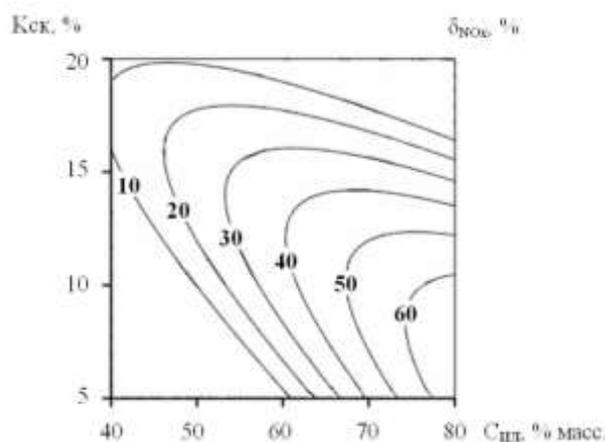


Рис. 3. Зависимость степени очистки от оксида азота ( $\delta_{NOx}$ ) от состава каталитического материала (ИЛ) и потери массы в смеси кислот (Кск)

Значительным образом отличаются зависимости при изучении свойств материала на основе руды ильменит. Со снижением содержания базового компонента в составе шихты в интервале 77,49...48,15% по массе устойчивость к воздействию кислот уменьшается в интервале 10,05...14,32%. Степень очистки от оксидов азота изменяется от 65 до 20%.

Оптимальным принят состав шихты, в составе которого содержание руды ильменит составляет 66,86% по массе, что обеспечивает потерю массы в смеси кислот на уровне 11,1% и степень очистки от оксидов азота – 49%.

На основании вышеприведенного можно говорить о преимуществе пористого проницаемого СВС-каталитического материала на основе руды ильменит перед материалами на основе окалина стали и формовочной глины.

Окончательный вывод о приоритетности использования базового компонента можно сделать только после оценки эффективности каталитического материала относительно очистки отработавших газов от оксидов серы.

В связи с этим был проведен комплекс дополнительных исследований, результаты которых представлены на рисунках 4–6.

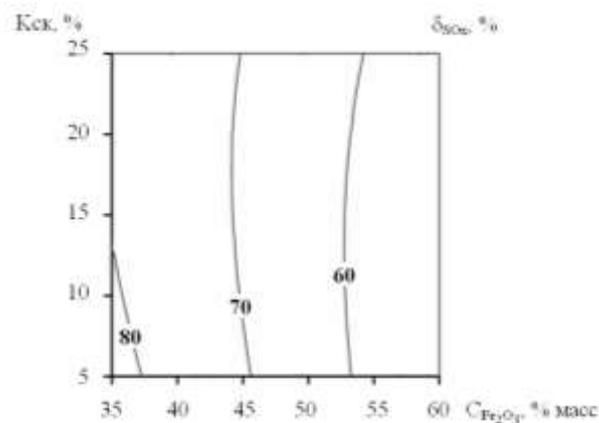


Рис. 4. Зависимость степени очистки от оксида азота ( $\delta_{SOx}$ ) от состава каталитического материала (ОС) и потери массы в смеси кислот (Кск)

Ранее в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени

очистки от оксида серы от состава каталитического материала на основе окалины стали и потери массы в смеси кислот и являются принципиально новыми. Выявленные зависимости были описаны следующим выражением:

$$\delta_{SO_x} = 117,394 - 0,684232C_{Fe_2O_3} - 0,959303K_{CK} - 0,006955C_{Fe_2O_3}^2 + 0,011595K_{CK}^2 + 0,012458C_{Fe_2O_3}K_{CK}, \% \quad (4)$$

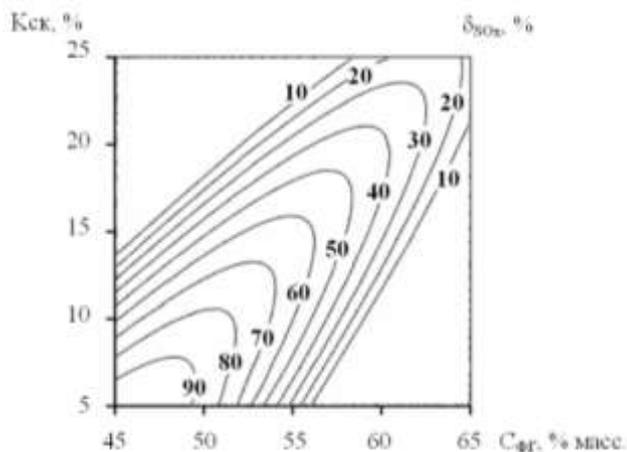


Рис. 5. Зависимость степени очистки от оксида азота ( $\delta_{SO_x}$ ) от состава каталитического материала (ФГ) и потери массы в смеси кислот (Кск)

Ранее в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени очистки от оксида серы от состава каталитического материала на основе формочной глины и потери массы в смеси кислот и являются принципиально новыми. Выявленные зависимости были описаны следующим выражением:

$$\delta_{SO_x} = -1387,944 + 71,582685C_{ФГ} - 61,566415K_{CK} - 0,853107C_{ФГ}^2 - 0,580864K_{CK}^2 + 1,392009C_{ФГ}K_{CK}, \% \quad (5)$$

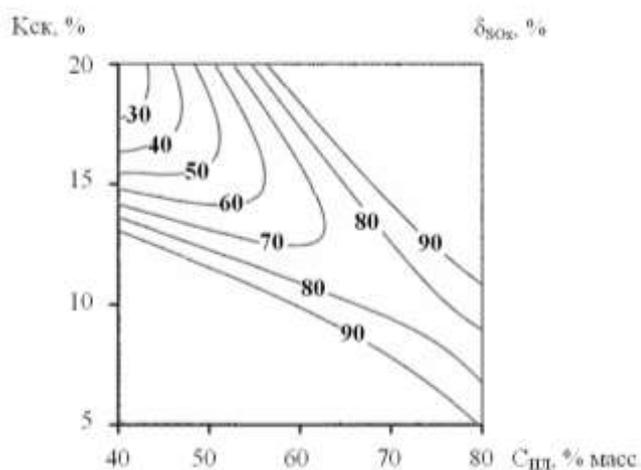


Рис. 6. Зависимость степени очистки от оксида азота ( $\delta_{SO_x}$ ) от состава каталитического материала (ИЛ) и потери массы в смеси кислот (Кск)

Ранее в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени очистки от оксида серы от состава каталитического материала на основе руды ильменит и потери массы в смеси кислот и являются принципиально новыми. Выявленные зависимости были описаны следующим выражением:

$$\delta_{SO_x} = 1392,310 - 23,009687C_{ши} - 97,281648K_{ck} + 0,096543C_{ши}^2 + 1,477143K_{ck}^2 + 0,926268C_{ши}K_{ck}, \quad \% \quad (6)$$

### **Заключение, выводы**

В результате анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- для материала на основе окалины стали: при увеличении содержания базового компонента в шихте степень очистки от оксидов серы изменяется в интервале 74,1...57,9%; оптимальный состав (47,82% по массе) обеспечивает степень очистки от оксидов серы на уровне 66% при  $K_{ck}=13,3\%$ ;
- для материала на основе формовочной глины: при увеличении содержания базового компонента в шихте степень очистки от оксидов серы изменяется в интервале 75,0...44,0%; оптимальный состав (56,30% по массе) обеспечивает степень очистки от оксидов серы на уровне 60% при  $K_{ck}=14,12\%$ ;
- для материала на основе руды ильменит: при увеличении содержания базового компонента в шихте степень очистки от оксидов серы изменяется в интервале 59,8...82,2%; оптимальный состав (66,86% по массе) обеспечивает степень очистки от оксидов серы на уровне 74% при  $K_{ck}=11,1\%$ .

В результате проведенного комплекса экспериментальных исследований был определен не только качественный состав пористого проницаемого СВС-каталитического материала системы очистки отработавших газов судовых дизелей, но и оптимальное количество базового компонента в составе шихты, обеспечивающий необходимые для очистки отработавших газов свойства и характеристики, а также обеспечить высокую степень коррозионной стойкости.

### **Список литературы:**

1. Heuberger C.F., Staffell I., Shah N. and Mac Dowell N. Energy Environ. Sci., 2016, 9, 2497 -2510 RSC .
2. M. Bui, C.S. Adjiman, A. Bardow, E.J. Anthony, A. Boston, S. Brown, P.S. Fennell, S. Fuss, A. Galindo, L.A. Hackett, J.P. Hallett, H. J. Herzog, G. Jackson, J. Kemper, S. Krevor, G.C. Maitland, M. Matuszewski, I.S. Metcalfe, C. Petit, G. Puxty, J. Reimer, D.M. Reiner, E.S. Rubin, S. A. Scott, N. Shah, B. Smit, J. P. M. Trusler, P. Webley, J. Wilcox and N. Mac Dowell, Energy Environ. Sci., 2018, 11, 1062 -1176 RSC .
3. P.J. Bonitatibus Jr., S. Chakraborty, M.D. Doherty, O. Siclovan, W.D. Jones and G.L. Soloveichik, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 2015, 112, 1687 -1692 CrossRef PubMed .
4. M. Pena-Lopez, H. Neumann and M. Beller, ChemCatChem, 2015, 7, 865–871 CrossRef CAS .
5. E.A. Bielinski, M. Forster, Y. Zhang, W.H. Bernskoetter, N. Hazari and M.C. Holthausen, ACS Catal., 2015, 5, 2404 -2415 CrossRef CAS .
6. Новиков, Л.А. Оценка дополнительных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии на судах/ Л.А. Новиков, В.С. Корчинский// Двигателестроение. – 2016. – № 3. – С. 23–31.
7. Kamyshev Yu.N., Medvedev G.V., Gorlova N.N. Purification of marine diesel exhaust gases by means of porous permeable corrosion-resistant materials. Transactions of the Krylov State Research Center. 2019; Special Edition 2: 187–197
8. Медведев, Г. Снижение вредных выбросов дизелей путем их селективной очистки. Очистка отработавших газов дизелей, в каталитических блоках нейтрализаторов, изготовленных по технологии СВС/ Г. Медведев, А. Новоселов. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 205 с.
9. Kolomeets, M.A. Porous SHS-materials based on iron oxide and aluminum with additions of alloying elements / M.A. Kolomeets, A.V. Maetskii, T.V. Novoselova [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. – 2017. – Vol. 58, № 3. – p. 293–298.

10. Коломеец, М.А. Влияние технологии изготовления пористого композиционного материала каталитического нейтрализатора отработавших газов дизелей на его микроструктуру / М.А. Коломеец, А.А. Ситников, Г.В. Медведев, Н.П. Тубалов, Н.Н. Горлова // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4. – Т.2. – С. 200–203.
11. Новоселов А.А. Использование композитных материалов на основе окалины стали в системах очистки отработавших газов дизелей / А.А. Новоселов, А.Л. Новоселов, А.Е. Бакланов, Н.Н. Горлова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 197–200.
12. Пат. 2530184 Россия, МПК В22F 3/23 (2006.01), С22С 1/05 (2006.01), С22С 29/12 (2006.01), С04В 38/00 (2006.01). АлтГТУ. Шихта для получения пористого проницаемого каталитического материала [Текст] / Н.Н. Горлова, А.Л. Новоселов, Г.В. Медведев, Д.С. Печенникова, А.А. Новоселов (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), ОИПС). – № 2013139722/02; заявл. 27.08.2013; опубл. 10.10.2014. Рус.
13. Пат. 2615674 Россия, МПК В22F 3/23 (2006.01), С22С 1/05 (2006.01), С22С 29/12 (2006.01), С04В 38/00 (2006.01). АлтГТУ. Шихта с палладием для получения пористого проницаемого каталитического материала [Текст] / М.С. Канапинов, Н.Н. Горлова, Г.В. Медведев, Н.П. Тубалов (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), ОИПС). – № 2015150613; заявл. 25.11.2015; опубл. 06.04.2017. Рус.
14. Горлова Н.Н. Обеспечение коррозионной стойкости пористых проницаемых каталитических СВС-материалов оптимальным составом и его заданными функциональными свойствами / Н.Н. Горлова // Ползуновский альманах. – 2017. – № 3. – Т.1. – С. 134–137.
15. Савицкий Е.М. Металловедение редкоземельных металлов / Е.М. Савицкий, В.Ф. Терехова. – М.: Наука, 1975. – 272 с.

## THE USE OF CATALYTIC NEUTRALIZATION FOR THE PURIFICATION OF EXHAUST GASES FROM MARINE POWER PLANTS IN AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT

**Nina N. Gorlova,**

*Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Altai Territory, Russia*

*Annotation. Among the methods used, the most effective, from the point of view of the quality of cleaning from the main harmful substances, is catalytic neutralization. The effectiveness of using this method is largely determined by the properties and characteristics of the used catalytic material. Selection of the appropriate composition determines the provision of physical, physico-mechanical and corrosive properties of the used catalytic materials. In this regard, the possibilities of using steel oxide and molding clay as basic components in the charge of the material were studied. In order to reduce the cost of the treatment system, the possibility of replacing valuable expensive components with ore mills of the appropriate composition was considered.*

*As a result of the studies, the optimal qualitative and quantitative composition of the charge of the catalytic material was determined.*

*Keywords: ships, power plants, sulfur oxides, nitrogen oxides, catalytic neutralization, porous materials.*

### References:

1. C.F. Heuberger, I. Staffell, N. Shah and N. Mac Dowell, Energy Environ. Sci., 2016, **9**, 2497-2510 RSC.
2. M. Bui, C.S. Adjiman, A. Bardow, E.J. Anthony, A. Boston, S. Brown, P.S. Fennell, S. Fuss, A. Galindo, L. A. Hackett, J. P. Hallett, H. J. Herzog, G. Jackson, J. Kemper, S. Krevor, G. C. Maitland, M. Matuszewski, I. S. Metcalfe, C. Petit, G. Puxty, J. Reimer, D. M. Reiner, E. S. Rubin, S. A. Scott, N. Shah, B. Smit, J. P. M. Trusler, P. Webley, J. Wilcox and N. Mac Dowell, Energy Environ. Sci., 2018, **11**, 1062 -1176 RSC .

3. P.J. Bonitatibus Jr., S. Chakraborty, M.D. Doherty, O. Siclovan, W.D. Jones and G.L. Soloveichik, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 2015, 112, 1687 -1692 CrossRef PubMed .
4. M. Pena-Lopez, H. Neumann and M. Beller, ChemCatChem, 2015, 7, 865 -871 CrossRef CAS .
5. E.A. Bielinski, M. Forster, Y. Zhang, W.H. Bernskoetter, N. Hazari and M.C. Holthausen, ACS Catal., 2015, 5, 2404 -2415 CrossRef CAS .
6. Novikov, L.A. Ocenka dopolnitel'ny'x zatrat sudovladel'cev pri ispol'zovanii SCR-texnologii na sudax/ L.A. Novikov, V.S. Korchinskij// Dvigatellestroenie. – 2016. – № 3. – S. 23–31.
7. Kamyshev Yu.N., Medvedev G.V., Gorlova N.N. Purification of marine diesel exhaust gases by means of porous permeable corrosion-resistant materials. Transactions of the Krylov State Research Center. 2019; Special Edition 2: 187–197
8. Medvedev, G. Snizhenie vredny'x vy'brosov dizelej putem ix selektivnoj ochistki. Ochistka otrabotavshix gazov dizelej, v kataliticheskix blokax nejtralizatorov, izgotovlenny'x po texnologii SVS/ G. Medvedev, A. Novoselov. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 205 s.
9. Kolomeets, M.A. Porous SHS-materials based on iron oxide and aluminum with additions of alloying elements / M.A. Kolomeets, A.V. Maetskii, T.V. Novoselova [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. – 2017. – Vol. 58, № 3. – p. 293–298.
10. Kolomeecz, M.A. Vliyanie texnologii izgotovleniya poristogo kompozicionnogo materiala kataliticheskogo nejtralizatora otrabotavshix gazov dizelej na ego mikrostrukturu / M.A. Kolomeecz, A.A. Sitnikov, G.V. Medvedev, N.P. Tubalov, N.N. Gorlova//Polzunovskij vestnik.– 2014. – № 4. – T.2. – S. 200–203.
11. Novoselov, A.A. Ispol'zovanie kompozitny'x materialov na osnove okaliny` stali v sistemax ochistki otrabotavshix gazov dizelej / A.A. Novoselov, A.L. Novoselov, A.E. Baklanov, N.N. Gorlova// Nauchny'e problemy` transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. – 2013. – № 1. – S. 197–200.
12. Pat. 2530184 Rossiya, MPK B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). AltGTU. Shixta dlya polucheniya poristogo proniczaemogo kataliticheskogo materiala [Tekst]/ N.N. Gorlova, A.L. Novoselov, G. V. Medvedev, D. S. Pechennikova, A.A. Novoselov (656038, Altajskij kraj, g. Barnaul, pr. Lenina, 46, FGBOU VPO «Altajskij gosudarstvenny'j texniceskij universitet im. I.I. Polzunova» (AltGTU), OIPS). – № 2013139722/02; zayavl. 27.08.2013 ; opubl. 10.10.2014. Rus.
13. Pat. 2615674 Rossiya, MPK B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). AltGTU. Shixta s palladiem dlya polucheniya poristogo proniczaemogo kataliticheskogo materiala [Tekst]/ M.S. Kanapinov, N.N. Gorlova, G.V. Medvedev, N.P. Tubalov (656038, Altajskij kraj, g. Barnaul, pr. Lenina, 46, FGBOU VO «Altajskij gosudarstvenny'j texniceskij universitet im. I.I. Polzunova» (AltGTU), OIPS).- №2015150613; zayavl. 25.11.2015; opubl. 06.04.2017. Rus.
14. Gorlova, N.N. Obespechenie korrozionnoj stojkosti poristy'x proniczaemy'x kataliticheskix SVS – materialov optimal'ny'm sostavom i ego zadanny'mi funkcional'ny'mi svojstvami/ N.N. Gorlova// Polzunovskij al'manax.– 2017.– № 3. – T.1.– S. 134–137.
15. Saviczkiy, E.M. Metallovedenie redkozemel'ny'x metallov / E.M. Saviczkiy, V.F. Terexova. – M.: Nauka, 1975. – 272 s.

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

**Нина Николаевна Горлова**, доцент, к.т.н.,  
доцент, кафедра Менеджмента, Алтайский гос-  
ударственный технический университет  
им. И.И. Ползунова (ФГБОУ ВО «АлтГТУ»),  
656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр.  
Ленина, 46,  
e-mail: Gnn.09@mail.ru

**Nina N. Gorlova**, Candidate of Engineering  
Sciences, Associate Professor, Department of  
ground transportation and technological systems,  
Polzunov Altai State Technical University,  
46, Lenin Av., Barnaul, Altai Territory, 656038,  
Russia

Статья поступила в редакцию 25.12.2019 г.

УДК 629.5.03:621.43.068-021.465

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.47>

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА КАЧЕСТВО ИХ ОЧИСТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ

**Г.В. Медведев**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
г. Барнаул, Алтайский край, Россия*

**М.Ю. Храмов**

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

*Аннотация: Использование каталитической нейтрализации с целью очистки вредных выбросов судовых энергетических установок позволяет значительным образом снизить негативное воздействие отработавших газов на все объекты окружающей среды. Привлекательность предлагаемого метода заключается в возможности подбора соответствующего состава каталитического материала в зависимости от требуемой степени очистки.*

*Функциональные свойства каталитических материалов во многом определяются качественным и количественным составом используемого материала, а также условиями его эксплуатации – температурным режимом.*

*С целью определения приемлемого состава материала каталитического нейтрализатора были проведены исследования на материалах различного состава. Оптимальная степень очистки была достигнута на материалах, содержащих ценные компоненты (родий, иридий, палладий). Однако важным является вопрос снижения стоимости системы очистки, в связи с чем изучена возможность замещения таких металлов размолами руд (бастнезит, лопарит).*

*Ключевые слова: катализаторы, каталитическая нейтрализация, МАРПОЛ 73/78, нейтрализация, степень очистки, судно, температурный диапазон, энергетическая установка.*

### Введение

Используемый для очистки отработавших газов судовых энергетических установок (СЭУ) от токсичных веществ метод каталитической нейтрализации привлекателен возможностью использования материалов, различных качественным и количественным составом, получаемых с помощью различных технологий.

К используемым каталитическим материалам в системе очистки отработавших газов СЭУ предъявляется ряд требований, основными из которых является диапазон их рабочих температур и качество очистки от вредных соединений [1].

Нормирование содержания оксидов азота в отработавших газах СЭУ (согласно МАРПОЛ 73/78) предопределяет необходимость использования таких каталитических материалов, которые бы позволили после очистки получать безопасное для окружающей среды соединение. При этом способ очистки должен быть экономически эффективным и технологически приемлемым [2, 3, 4].

Используемые в большинстве случаев каталитические материалы в своем составе содержат дорогие компоненты: родий, иридий, палладий, платину, которые являются хорошими катализаторами [5].

Перспективным способом получения каталитических материалов с заданными свойствами и характеристиками является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [6].

### Материалы и методы

С целью определения технологической целесообразности использования редкоземельных ценных компонентов при получении каталитических материалов с помощью СВС проведены опытные исследования.

Целью экспериментов было определение оптимального количества добавляемых к базовому составу каталитических компонентов с целью придания материалу приемлемых свойств и характеристик, а также возможности реализовывать свои функции в диапазоне рабочих температур СЭУ.

Определение диапазона температур эффективного использования отдельных каталитических материалов проводилось на пилотной установке на базе дизеля 6Ч15/18 (Рис. 1) [7].

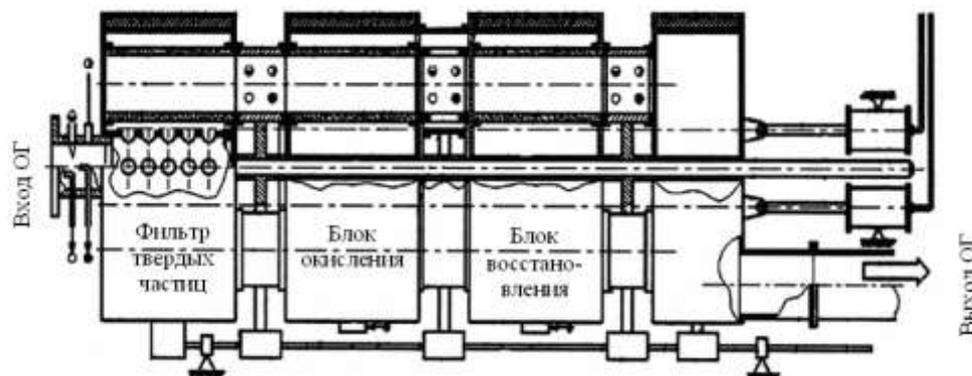


Рис. 1. Общий вид пилотной установки для испытаний кассетного нейтрализатора отработавших газов двигателя внутреннего сгорания (патент РФ № 2511833)

### Результаты

Испытания проводились для блоков каталитических материалов различного состава на отработавших газах одного состава, с одинаковой температурой, плотностью, скоростью газового потока, на блоках одинаковой конструкции с идентичной пористостью и извилистостью пор. Исследования характеризовались соблюдением идентичных условий и однопоточности во времени. Также условия проведения исследований позволили на равном фоне воздействия на ход процесса окисления продуктов неполного сгорания и восстановления веществ оценить эффективность использования каталитических материалов различных составов [8].

Использование размола определенных руд, позволяющих замещать ценные дорогие элементы (в большинстве случаев редкоземельные), позволяет не только обеспечить каталитические материалы необходимыми свойствами и характеристиками, но и значительным образом снижать стоимость очистки отработавших газов СЭУ от опасных соединений [9].

В связи с этим была рассмотрена возможность замещения родия и иридия в составе материала на основе окалины стали размолами руд бастнезита и лопарита с последующей корректировкой качественного и количественного состава шихты. Такой подход также позволяет создать каталитический материал с использованием технологии СВС, обладающий лучшим набором свойств и характеристик.

Отработавшие газы, образующиеся в процессе сгорания жидкого топлива в СЭУ, имеют температуру около 700 К, что не может не сказаться на свойствах и характеристиках используемых каталитических материалов в системах очистки [10]. Проведенные опытные исследования позволили выявить следующее: каталитические материа-

лы с долей родия 0,1% по массе позволяют обеспечить необходимое качество очистки отработавших газов СЭУ от оксидов азота. Однако диапазон эффективности использования такого материала находится в интервале высоких температур отработавших газов СЭУ, а качество очистки составляет от 73–82% при 620 К до 87–92% при 900 К. Интервал рабочих температур соответствует нагрузке СЭУ 75–100%, но при нагрузке 100% работает менее 2 % всех СЭУ, основная нагрузка составляет 75–80%.

Следовательно, каталитические материалы, используемые в системе очистки отработавших газов СЭУ с использованием каталитической нейтрализации, содержащие родий в интервале рабочих температур 626–630 К и обеспечивают высокую эффективность очистки от оксидов азота.

Целесообразным оказалось использование палладия при получении каталитического материала, добавление которого в состав шихты обеспечивает степень очистки от оксидов азота при температуре 550 К составляет 50–62,5% и 81–87% при температуре отработавших газов 850 К. При использовании таких каталитических материалов необходимо учитывать тот факт, что прогрев каталитического нейтрализатора необходим исключительно на режимах малых нагрузок и холостых ходов до температуры отработавших газов СЭУ 550 К.

С целью расширения рабочего температурного диапазона возможно применение иридия (до 0,1%). При его использовании степень очистки отработавших газов СЭУ по содержанию оксидов азота снижается. Так, при 520 К степень очистки составляет от 45 до 55%, при температуре 850 К – от 65 до 67%. Охват всех режимов эксплуатации СЭУ обеспечивается именно добавлением в состав каталитического материала иридия [11].

Альтернативным вариантом применения иридия, родия, палладия и других редкоземельных металлов является добавление размола руды бастнезит [12], что обеспечивает эффективность очистки отработавших газов СЭУ от оксидов азота в интервале 54–66% при температуре отработавших газов 530 К и в интервале 66–73 % при температуре 825 К. Такой материал имеет диапазон активности с охватом практически всех режимов эксплуатации СЭУ.

Широким диапазоном рабочих температур эксплуатации СЭУ обладают катализаторы, основным компонентом которых является руда лопарит [13]. К недостаткам такого материала можно отнести низкую степень очистки от оксидов азота: от 29–40% при 550 К и до 46–54% при 850 К. Результаты исследований приведены на Рис. 2.

Злободневным является вопрос снижения концентрации углеводородов в отработавших газах СЭУ, которые оказывают негативное влияние на все компоненты окружающей среды.

Снижение концентрации углеводородов достаточно изучено. Однако основная масса исследований проводилась на материалах, содержащих редкоземельные металлы (платину, палладий, родий и другие). В то же время имеются противоречивые данные о температурных диапазонах эффективности очистки отработавших газов от углеводородов с использованием различных катализаторов.

Значительное снижение концентрации углеводородов в отработавших газах наблюдается при добавлении родия в состав каталитического материала. При температуре 450 К степень очистки составляет 71–84%, при 860 К – 88,5–93%. С точки зрения эксплуатационных характеристик такой каталитический материал имеет достаточно широкий диапазон температур рабочих режимов.

Наличие в составе каталитических материалов иридия (до 0,1%) позволило снизить содержание углеводородов в отработавших газах СЭУ от 72–81% при температуре 515 К до 81–97% при 870 К.

Добавление палладия в состав каталитического материала (до 0,2%) показало лучшее качество очистки от углеводородов при более высоких рабочих температурах: 94–96% при 700 К [14]. При температуре отработавших газов 450 К степень очистки составляет 55–75%. При работе СЭУ на режиме меньше 450 К качество очистки от углеводородов ухудшается.

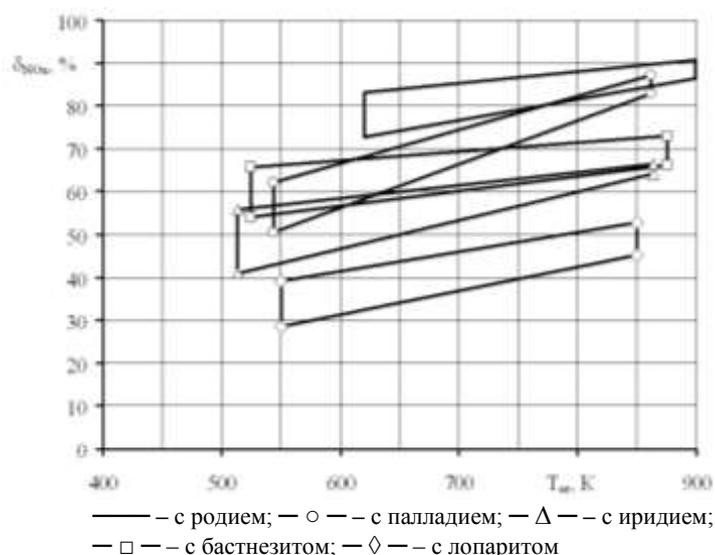


Рис. 2. Качество очистки отработавших газов СЭУ от соединений азота в рабочих температурных диапазонах, на материалах различного состава

### Обсуждение

Проведенные исследования на каталитических материалах с добавлением руды бастнезит и лопарит позволили получить следующие результаты:

– активная способность катализатора на основе руды бастнезит наблюдается в диапазоне температур 442-860 К. Качество очистки при граничных температурах составляет 49–59% и 63–67% соответственно;

– рабочий интервал температур для каталитического материала на основе руды лопарит составляет 460-840 К. Степень очистки при рабочих температурах составляет 39–46% и 49–56% соответственно. Результаты исследований приведены на Рис. 3.

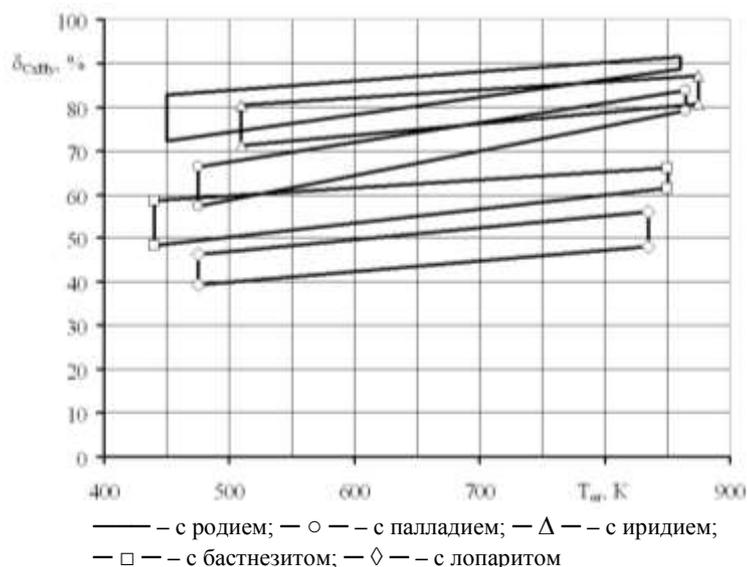


Рис. 3. Качество очистки отработавших газов СЭУ от углеводородов в рабочих температурных диапазонах, на материалах различного состава

Из графиков, приведенных на Рис. 3, видно, что наименьшая эффективность очистки отработавших газов СЭУ от углеводородов наблюдается при добавлении в состав шихты каталитического материала руды лопарит.

Сокращение количества оксида углерода в отработавших газах СЭУ является одной из актуальных задач [15].

С целью контроля над выбросами оксидов углерода, выбросы СЭУ этого соединения нормируются российскими и мировыми стандартами.

Выбор наиболее приемлемого состава каталитического материала, используемого для снижения количества выбрасываемого оксида углерода в окружающую среду от СЭУ, осуществлялся на основании сравнения интервала рабочих температур и степени очистки в этих условиях. Результаты экспериментальных исследований представлены на Рис. 4.

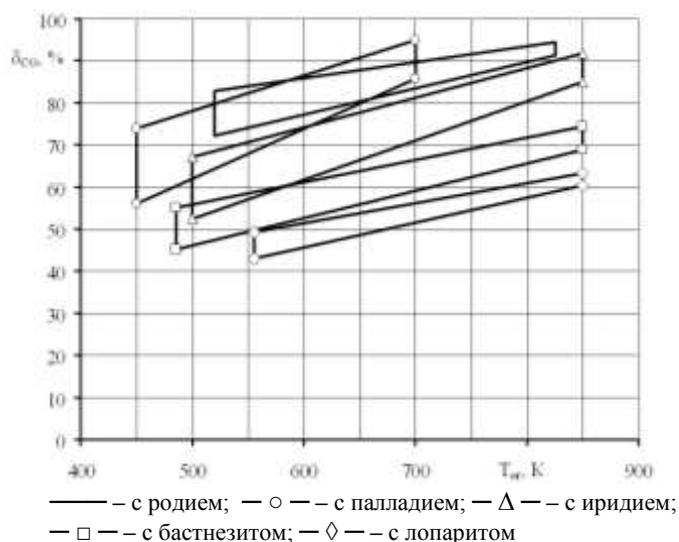


Рис. 4. Качество очистки отработавших газов СЭУ от оксида углерода в рабочих температурных диапазонах, на материалах различного состава

Из приведенных на Рис. 4. зависимостей можно сделать следующий вывод:

– максимальная степень очистки достигается с использованием палладия в составе каталитического материала и составляет 85–95% при температуре 700 К. Однако интервал рабочих температур (450–700 К) недостаточен с точки зрения эксплуатационных параметров работы СЭУ;

– наибольшим интервалом рабочих температур обладает каталитический материал с добавлением руды бастнезит (480–850 К). Качество очистки при этом составляет от 44–55% до 39–72%.

#### Заключение, выводы

Результатом исследований является возможность использования размола руд бастнезит и лопарит в качестве замещающих ценных, дорогих компонентов в составе каталитических материалов при очистке отработавших газов СЭУ, обеспечивающих приемлемую степень очистки от оксидов азота, углеводородов и оксидов углерода. Использование таких каталитических материалов значительным образом снижает стоимость каталитического материала и всей системы очистки отработавших газов СЭУ.

#### Список литературы:

1. Heibel, A. Losungen zur Einhaltung der Grenzwerte für Nutzfahrzeug – emissionen der nachten

- Dekade basierend auf EPA 2007 und EUV/ A. Heibel, U. Zink// Motortechn. Z. – 2007. – 68. – № 7–8. – С. 570–574, 7 ил. Библ. 6. Нем.
2. Гришкин В.В. Современные требования к судам в части минимизации воздействия на окружающую среду/ В.В. Гришкин, М.В. Петров// Сборник докладов VI международный форум Экология, 26–27 февраля 2015, СПб. – С. 17–25.
3. Тимофеев О.Я. Особенности внедрения новых требований к экологической безопасности судов и морских установок в северных морях и на арктическом шельфе/ О.Я. Тимофеев, Н.А. Вальдман, М.И. Крыжевич// Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 3. – С. 79–85.
4. Kurok, C. Partikelminderung durch Schwefelgrenzwerte/ Kurok Claus (Germanischer Lloyd AG, GL. «Anolysetechnik», Hamburg)// Schiff und Hafen, 2008. – 60, № 9. – С. 118, 120–122, 6 ил. Библ. 5. Нем.; рез. англ.
5. Бакланов А.Е., Канапинов М.С., Малашина С.А., Новоселова Т.В., Ситников А.А., Тубалов Н.П. Получение пористых проницаемых металлокерамических материалов с использованием руд полиметаллов взамен редкоземельных элементов. – Ползуновский вестник, 2016, №2, С. 205–212.
6. Бразовский В.В., Кашкаров Г.М., Ситников А.А. и др Исследование параметров, влияющих на качество очистки отработавших газов дизелей. – Ползуновский вестник. -2012. -№ 3/1. – С. 224–231.
7. Пат. 2511833 Россия, МПК F01N 11/00 (2006.01), G01M 15/00(2006.01). АлтГТУ. Установка для испытаний кассетного нейтрализатора отработавших газов двигателя внутреннего сгорания [Текст]/ К.С. Боков, Г.В. Медведев, Д.С. Печенникова, А.Л. Новоселов, А.А. Новоселов (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), ОИПС). – №2012132961/06; заявл. 01.08.2012 ; опублик. 10.04.2014. Рус.
8. Медведев, Г.В. Металлокерамические фильтры очистки токсичных газов: водный транспорт: монография/ Г.В. Медведев; под ред. В.П. Горелова. – Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. ун-та водн. трансп., 2017.- 410 с. 2-е изд. Стер. – М. – Берлин : Директ Медиа, 2017. – 332 с.
9. Горлова Н.Н. Каталитические материалы, замещающие благородные металлы в нейтрализаторах для дизелей/ Н.Н. Горлова, Г.В. Медведев// Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы II всероссийской научно-технической конференции 23–24 ноября 2012 г./ под ред. А.В. Шашка. – Рубцовск, 2012 – С. 92–98.
10. Development of non – Ni low H<sub>2</sub>S Pt/Rh/CeO<sub>2</sub> TWC Catalyst/ Xamada T., Kadano K., Funabiki M.// SAE Techn. Pap.Ser. – 1990. –№ 900611. – С. 1–8.
11. Пат. 2530187 Россия, МПК B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). АлтГТУ. Шихта с родием и иридием для получения пористого проницаемого каталитического материала [Текст]/ Н.Н. Горлова, А.Л. Новоселов, Г.В. Медведев, Д.С. Печенникова, А.А. Новоселов (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), ОИПС). – № 2013139974/02; заявл. 27.08.2013 ; опублик. 10.10.2014. Рус.
12. Пат. 2530186 Россия, МПК B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). АлтГТУ. Шихта с бабблитоном для получения пористого проницаемого каталитического материала [Текст]/ Н.Н. Горлова, А.Л. Новоселов, Г.В. Медведев, Д.С. Печенникова, А.А. Новоселов (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), ОИПС). – № 2013139973/02 ; заявл. 27.08.2013 ; опублик. 10.10.2014. Рус.
13. Пат. 2532745 Россия, МПК B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). АлтГТУ. Шихта с лопаритом для получения пористого проницаемого каталитического материала [Текст]/ Н.Н. Горлова, А.Л. Новоселов, Г.В. Медведев, Д.С. Печенникова, А.А. Новоселов (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), ОИПС). – № 2013139946/02; заявл. 27.08.2013 ; опублик. 10.11.2014. Рус.
14. Пат. 2615674 Россия, МПК B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). АлтГТУ. Шихта с палладием для получения пористого проницаемого каталитического материала [Текст]/ М.С. Канапинов, Н.Н. Горлова, Г.В. Медведев, Н.П. Тубалов (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), ОИПС). – №2015150613; заявл. 25.11.2015; опублик. 06.04.2017. Рус.
15. Gloeckle M. Abgasanlage mit Filtereinrichtung und Absorberkatalysator für eine Brennkraftmaschine: Заявка 102007034035 Германия, МПК F 01 N 3/035 (2006.01), F 01 N 3/08 (2006.01) / Robert Bosch GmbH, M. Gloeckle, C. Osemman// № 102007034035.6; Заявл. 20.07.2007; Опубли.

22.01.2009. Нем.

## THE EFFECT OF MARINE POWER PLANTS EXHAUST GASES TEMPERATURE ON THE QUALITY OF THEIR CLEANING USING THE CATALYTIC NEUTRALIZATION METHOD

**Gennady V. Medvedev,**

*Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Altai Territory, Russia*

**Mikhail Y. Khramov,**

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

*Annotation. The use of catalytic neutralization for the purification of harmful emissions from ship power plants can significantly reduce the negative impact of exhaust gases on all environmental objects. The attractiveness of the proposed method lies in the possibility of selecting the appropriate composition of the catalytic material depending on the required degree of purification.*

*The functional properties of catalytic materials are largely determined by the qualitative and quantitative composition of the material used, as well as the conditions of its operation - the temperature regime.*

*In order to determine the acceptable composition of the catalytic converter material, we made an analyses of materials of various compositions. The optimum degree of purification was achieved on materials containing valuable components (rhodium, iridium, palladium). However, the issue of reducing the treatment system cost is important. So, the possibility of replacing such metals with ore grindings (bastnesite, loparite) has been studied in the paper.*

*Keywords: catalysts, catalytic neutralization, neutralization, MARPOL 73/78, degree of purification, vessel, temperature range, power plant.*

### References:

1. Heibel, A. Losungen zur Einhaltung der Grenzwerte für Nutzfahrzeug – emissionen der nachten Dekade basierend auf ЕПА 2007 und EUV/ A. Heibel, U. Zink// Motortechn. Z. – 2007. – 68. – № 7–8. – С. 570–574, 7 ил. Библ. 6. Нем.
2. Grishkin, V.V. Sovremenny'e trebovaniya k sudam v chasti minimizacii vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu/ V.V. Grishkin, M.V. Petrov// Sbornik dokladov VI mezhdunarodny'j forum E'KOLOGIYA, 26 – 27 fevralya 2015, SPb. – S. 17 -25.
3. Timofeev, O. Ya. Osobennosti vnedreniya novy'x trebovanij k e'kologicheskoy bezopasnosti sudov i morskix ustanovok v severny'x moryax i na arkticheskom shel'fe/ O.Ya. Timofeev, N.A. Val'dman, M.I. Kry'zhevich// Arktika: e'kologiya i e'konomika. – 2014. – № 3. – S. 79 -85.
4. Kurok, C. Partikelminderung durch Schwefelgrenzwerte/ Kurok Claus (Germanischer Lloyd AG, GL. «Anolysetechnik», Hamburg)// Schiff und Hafen, 2008. – 60, № 9. – С. 118, 120–122, 6 ил. Библ. 5. Нем.; рез. англ.
5. Baklanov A.E., Kanarinov M.S., Malashina S.A., Novoselova T.V., Sitnikov A.A., Tubalov N.P. Poluchenie poristy'x proniczaemy'x metallokeramicheskix materialov s ispol'zovaniem rud polimetallov vzamen redkozemel'ny'x e'lementov. – Polzunovskij vestnik, 2016, № 2, S. 205 – 212.
6. Brazovskij V.V., Kashkarov G.M., Sitnikov A.A. i dr Issledovanie parametrov, vliyayushhix na kachestvo ochistki otrabotavshix gazov dizelej. – Polzunovskij vestnik. -2012. -№ 3/1. – S. 224 – 231.
7. Pat. 2511833 Rossiya, MPK F01N 11/00 (2006.01), G01M 15/00(2006.01). AltGTU. Ustanovka dlya ispy'tanij kassetnogo nejtralizatora otrabotavshix gazov dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Tekst]/ K. S.Bokov, G. V. Medvedev, D. S. Pechennikova, A. L. Novoselov, A. A. Novoselov (656038, Altajskij kraj, g. Barnaul, pr. Lenina, 46, FGBOU VPO «Altajskij gosudarstvenny'j texnicheskij universitet im. I.I. Polzunova» (AltGTU), OIPS). – №2012132961/06; zayavl. 01.08.2012 ; opubl. 10.04.2014. Rus.
8. Medvedev, G.V. Metallokeramicheskie fil'try' ochistki toksichny'x gazov: vodny'j transport: monografiya/ G.V. Medvedev; pod. red. V.P. Gorelova. – Novosibirsk: Izd-vo Sib. gos. un-ta vodn. transp., 2017.- 410 s. 2-e izd. Ster. – .M. – Berlin : Direkt Media, 2017. – 332 s.

9. Gorlova, N.N. Kataliticheskie materialy`, zameshayushhie blagorodny`e metally` v nejtralizatorax dlya dizelej/ N.N. Gorlova, G.V. Medvedev// *Sovremennaya texnika i texnologii: problemy`, sostoyanie i perspektivy` : materialy` II vsrossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii 23 – 24 noyabrya 2012 g./ pod red. A.V. Shashka. – Rubczovsk, 2012 – S. 92 -98.*
10. Development of non – Ni low H<sub>2</sub>S Pt/Rh/CeO<sub>2</sub> TWC Catalyst/ Xamada T., Kadano K., Funabiki M.// *SAE Techn. Pap.Ser. – 1990. –№ 900611. – С. 1–8.*
11. Pat. 2530187 Rossiya, MPK B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). AltGTU. Shixta s rodiem i iridiem dlya polucheniya poristogo proniczaemogo kataliticheskogo materiala [Tekst]/ N.N. Gorlova, A.L. Novoselov, G.V. Medvedev, D.S. Pechennikova, A.A. Novoselov (656038, Altajskij kraj, g. Barnaul, pr. Lenina, 46, FGBOU VPO «Altajskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet im. I.I. Polzunova» (AltGTU), OIPS). – № 2013139974/02 ; zayavl. 27.08.2013 ; opubl. 10.10.2014. Rus.
12. Pat. 2530186 Rossiya, MPK B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). AltGTU. Shixta s bastnezitom dlya polucheniya poristogo proniczaemogo kataliticheskogo materiala [Tekst]/ N. N. Gorlova, A.L. Novoselov, G.V. Medvedev, D. S. Pechennikova, A. A. Novoselov (656038, Altajskij kraj, g. Barnaul, pr. Lenina, 46, FGBOU VPO «Altajskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet im. I.I. Polzunova» (AltGTU), OIPS). – № 2013139973/02 ; zayavl. 27.08.2013 ; opubl. 10.10.2014. Rus.
13. Pat. 2532745 Rossiya, MPK B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). AltGTU. Shixta s loparitom dlya polucheniya poristogo proniczaemogo kataliticheskogo materiala [Tekst]/ N.N. Gorlova, A.L. Novoselov, G.V. Medvedev, D.S. Pechennikova, A.A. Novoselov (656038, Altajskij kraj, g. Barnaul, pr. Lenina, 46, FGBOU VPO «Altajskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet im. I. I. Polzunova» (AltGTU), OIPS). – № 2013139946/02 ; zayavl. 27.08.2013 ; opubl. 10.11.2014. Rus.
14. Pat. 2615674 Rossiya, MPK B22F 3/23 (2006.01), C22C 1/05 (2006.01), C22C 29/12 (2006.01), C04B 38/00 (2006.01). AltGTU. Shixta s palladiem dlya polucheniya poristogo proniczaemogo kataliticheskogo materiala [Tekst]/ M.S. Kanapinov, N.N. Gorlova, G.V. Medvedev, N.P. Tubalov (656038, Altajskij kraj, g. Barnaul, pr. Lenina, 46, FGBOU VO «Altajskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet im. I.I. Polzunova» (AltGTU), OIPS).- №2015150613; zayavl. 25.11.2015; opubl. 06.04.2017. Rus.
15. Gloeckle, M. Abgasanlage mit Filtereinrichtung und Absorberkatalysator für eine Brennkraftmaschine: Заявка 102007034035 Германия, МПК F 01 N 3/035 (2006.01), F 01 N 3/08 (2006.01)/ Robert Bosch GmbH, M. Gloeckle, C. Osemman// № 102007034035.6; Заявл. 20.07.2007; Опубл. 22.01.2009. Нем.

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

**Михаил Юрьевич Храмов**, к.т.н., доцент, кафедра «Эксплуатации судовых энергетических установок», Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: eseu655@vsawt.ru

**Геннадий Валериевич Медведев**, доцент, к.т.н., кафедра Наземных транспортно-технологических систем, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (ФГБОУ ВО «АлтГТУ»), 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46 e-mail: Genatswaly@mail.ru

**Mikhail Y. Khramov**, 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,

**Gennady V. Medvedev**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor Department of ground transportation and technological systems Polzunov Altai State Technical University 46 Lenin Ave., Barnaul, Altai Territory, Russia, 656038

Статья поступила в редакцию 25.11.2019 г.

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.48>

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУР ДВУХКОНТУРНОЙ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

**К.Ю. Федоровский**

*Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия*

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5345-6851>*

**Н.К. Федоровская**

*Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия*

*Аннотация. Рассматриваются вопросы создания экологически безопасных высоконадежных замкнутых систем охлаждения. Достижение указанных качеств обеспечивается отказом от приёма заборной охлаждающей воды. Проведен анализ различных теплоносителей энергоустановки, требующих охлаждения. Показано, что для охлаждения ряда теплоносителей целесообразно создание двухконтурных систем охлаждения. Это требует введения дополнительного теплообменника и разделения температурного напора между охлаждаемым теплоносителем и заборной водой. Предложен подход, позволяющий оптимальным образом распределить этот температурный напор между контурами. Данная процедура предусматривает сопоставление различных теплообменников на основе их приведенной площади. Представлена номограмма для определения оптимального значения температурного напора.*

*Ключевые слова: система охлаждения, судовая энергетическая установка, температурный напор, теплообменный аппарат, коэффициент теплопередачи*

### Введение

В настоящее время в судостроении наиболее широкое распространение получили разомкнутые системы охлаждения энергетических установок. В таких системах заборная вода используется в качестве охлаждающего теплоносителя.

Следует отметить, что все в большей степени проявляется интерес к созданию замкнутых систем охлаждения, в которых исключается приём заборной охлаждающей воды. В [1] указывается на все возрастающий интерес к созданию замкнутых систем охлаждения.

В [2] приводятся примеры использования данных систем на судах зарубежной постройки. Среди них – военные корабли, рыболовецкие суда, паромы, буксиры, яхты и т.д. Отвод теплоты от циркулирующей в системе пресной воды в окружающую акваторию осуществляется посредством размещенных снаружи герметичного корпуса судна специальных устройств теплоотвода [3–6], например, боксулеров, или же непосредственно через судовую обшивку [7–9], с помощью судовых обшивочных теплообменных аппаратов (ОТОВА). Последний представляет собой размещенную с внутренней стороны судовой обшивки систему лабиринтных каналов, в которых движется пресная охлаждаемая вода (Рис. 1).

Это обеспечивает достижение ряда технических и экологических преимуществ. Отказ от приема заборной морской воды позволяет, с одной стороны, отказаться от изготовления элементов системы охлаждения из коррозионно-стойких материалов. С другой стороны, система обеспечивает более надежное функционирование энергетической установки, особенно в условиях нахождения судна в сильно загрязненной акватории. При этом возможно прекращение поступления заборной охлаждающей воды вследствие засорения системы. Кроме этого, приём заборной воды в таких условиях приводит к усиленному коррозионно-эрозионному разрушению элементов системы контура заборной воды.

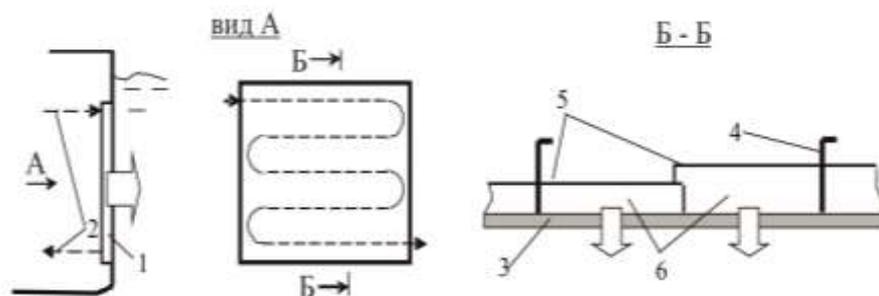


Рис. 1. Схема обшивочного теплообменника: 1 – ОТОА; 2 – подвод и отвод охлаждаемой воды; 3 – корпус судна; 4 – набор корпуса судна; 5 – внутренние листы; 6 – канал охлаждаемой воды

В работе [1] указывается, что важным преимуществом замкнутых систем охлаждения является тот факт, что удаётся снизить на 3...5 % энергозатраты судна. Данный вопрос чрезвычайно важен в аспекте реализации требований по энергоэффективности судов, обозначенных в главе 4 приложения VI Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 [10]. В соответствии с указанным документом, для различных типов судов вводятся ограничения по допустимому удельному выбросу углекислого газа, что однозначно связано с энергетическими затратами судна.

Переход на замкнутые системы охлаждения чрезвычайно важен и с позиции воздействия системы охлаждения на рыбные ресурсы морей и континентальных водоемов, в которых основой формируемых пищевых цепочек является планктон. Его размер измеряется от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Планктон интенсивно всасывается системой охлаждения и, пройдя через насосы, арматуру, теплообменники и т.д., практически полностью погибает. Имеющиеся фильтры на всасывание не могут предотвратить попадание планктона в систему, поскольку проходные отверстия обычно имеют диаметр около 2...4,5 мм. В [11] и [12] указывается, что при размерах проходных отверстий сетчатого фильтра менее 1 мм они интенсивно засоряются, в том числе планктоном, что ставит под угрозу нормальную работу системы охлаждения.

Характерным примером влияния количества планктона в море на рыбные ресурсы являются следующие. В конце девяностых годов в Чёрное и Азовское моря был завезен гребневик мнемипсис, напоминающий медузу, который обычно обитает у побережья Северной Америки. Данный организм обладает способностью размножаться с особой интенсивностью. При благоприятных условиях за сутки его суммарная масса может увеличиться на 30... 50%. При этом он питается планктоном, икринками и мельчайшими личинками рыб. В результате рыбная продуктивность указанных морей существенно снизилась. Так количество выловленной ставриды сократилось в 30...40 раз, а тюльки – в 400 раз [13].

При создании плавучей морской буровой установки проекта 10170 с суммарной мощностью энергетической установки 5000 кВт была выполнена оценка воздействия на рыбные ресурсы. Потребляемое количество забортной охлаждающей воды может достигать 400–800 м<sup>3</sup>/час. Расчёты, проведенные сотрудниками ЦКБ «Коралл» и Института морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН, показали, что только за три летних месяца уничтожается примерно 200 тонн рыбы промысловых видов.

В рамках рассматриваемого вопроса целесообразно обратиться к опыту создания и эксплуатации тепловых электростанций, часто располагаемых на берегу морей и континентальных водоемов и использующих их воду для охлаждения энергетических установок. При этом построение системы охлаждения подобно принятому в судостроении. Так, по данным [14] в районе Калининской тепловой электростанции примерно три раза уменьшилось количество рыбы.

Таким образом, совершенно очевидна целесообразность перехода в максимально возможной степени на замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок.

### Методы

При выполнении работы были использованы теоретические методы, включая анализ и систематизацию существующих требований и тенденций относительно систем охлаждения судовых энергетических установок. Опираясь на это, а также на известные результаты экспериментальных исследований, с использованием математических методов получены необходимые расчетные зависимости.

### Результаты

Судовая энергетическая установка включает в себя различное оборудование, требующее охлаждения. В первую очередь, это – дизель, с необходимостью отвода теплоты зарубашечного пространства, маслоохладителя, охладителя наддувочного воздуха, а также электрический генератор, установка кондиционирования воздуха и т.д. (Табл. 1).

Таблица 1

Примерные характеристики требующего охлаждаемого оборудования

оборудование	Охлаждаемая среда			Охлаждающая среда		
	тепло-носитель	температура выхода из оборудования, °С	охлажденные теплоносителя, °С	Тепло-носитель	максимальная температура. входа в охладитель оборудования, °С	подогрев теплоносителя °С
Зарубашечное пространство	металлические поверхности			вода	50...80	6...10
Маслоохладитель	масло	55...70	5...15	вода	32...85	5...7
Охладитель наддувочного воздуха	воздух	на 70...80° выше температуры входа охлаждающей воды	60...70	вода	32...55	3...10
Охлаждение эл. генератора	воздух	–	–	вода	32	1...2
Установка кондиционирования воздуха	фреон	60...100	30...40	вода	32	2...5
Холодильная машина	фреон	60...100	30...60	вода	32	4...5
Охлаждение компрессоров сжатого воздуха	металлические поверхности			вода	32	4...5

Температурный напор  $\Delta t$  в ОТОА равен

$$\Delta t = \bar{t}_1 - t_3,$$

где  $\bar{t}_1$  – средняя температура охлаждаемого теплоносителя;  
 $t_3$  – температура забортной воды.

С точки зрения сохранения максимального температурного напора  $\Delta t$  в ОТОА, что обеспечивает снижение его массогабаритных показателей, следовало бы масло и воздух подавать непосредственно канала ОТОА. Однако с практической точки зрения этого обычно не делают, поскольку увеличивается протяженность и габариты трубопроводов, воздухопроводов и т.д. Масло и воздух, как правило, охлаждаются водой, циркулирующей в системе. Это означает, что должны быть введены дополнительные промежуточные теплообменные аппараты (ПТ) маслоохладителя и воздухоохладителя. Таким образом, речь идёт о двухконтурной замкнутой системе охлаждения (Рис. 2).

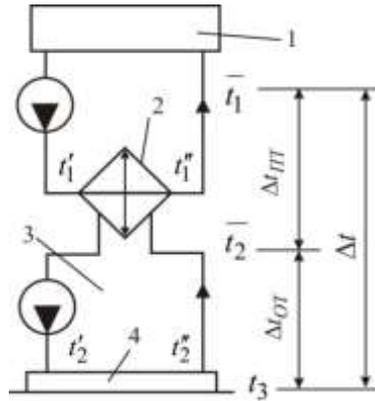


Рис. 2. Схема системы охлаждения: 1 – охлаждаемый двигатель; 2 – промежуточный теплообменник; 3 – промежуточный контур; 4 – ОТОА

На первых этапах проектирования систем обычно отсутствует детальная информация по ЭУ. При этом возникает проблема выбора оптимальной температуры теплоносителя промежуточного контура системы. Необходимо разработать подход, позволяющий решить данную проблему при минимальном количестве исходных данных.

При заданном  $\Delta t$  повышение  $\bar{t}_2$  приводит к увеличению теплопередающей поверхности  $F_{ПТ}$  промежуточного теплообменника и уменьшению теплопередающей поверхности  $F_{ОТ}$  ОТОА.

Площадь теплопередающей поверхности промежуточного теплообменника:

$$F_{ПТ} = Q / (K_{ПТ} \Delta t_{ПТ}). \quad (1)$$

Для обшивочного теплообменника соответствующая площадь:

$$F_{ОТ} = Q / (K_{ОТ} \Delta t_{ОТ}), \quad (2)$$

где  $\Delta t_{ПТ} = \bar{t}_1 - \bar{t}_2$ ;  $\Delta t_{ОТ} = \bar{t}_2 - \bar{t}_3$ .

Сопоставляя между собой стоимость насосов и теплообменников системы охлаждения, можно говорить, что стоимость последних значительно больше. В то же время теплообменники в зависимости от конструкции и назначения также отличаются между собой. Воспользуемся для них удельными показателями  $\varepsilon^c$  и  $\varepsilon^M$ , отражающими соответственно стоимость и массу единицы теплопередающей поверхности

$$\varepsilon^c = \frac{C}{F},$$

$$\varepsilon^M = \frac{M}{F}$$

Необходимо привести показатели различных типов теплообменников к одному типу. В нашем случае сделаем это относительно обшивочного теплообменника. Тогда в отношении стоимостного аспекта имеем

$$\Psi_c = \frac{\varepsilon_{\text{ПТ}}^c}{\varepsilon_{\text{ОТ}}^c},$$

где:  $\varepsilon_{\text{ПТ}}^c$  и  $\varepsilon_{\text{ОТ}}^c$  соответственно показатели  $\varepsilon^c$  и  $\varepsilon^m$  промежуточного и обшивочного теплообменника.

Аналогично в отношении массы

$$\Psi_m = \frac{\varepsilon_{\text{ПТ}}^m}{\varepsilon_{\text{ОТ}}^m}.$$

Численные значения величин  $\varepsilon^c$  и  $\varepsilon^m$  могут быть определены на основании соответствующей технической документации и прайсов.

В качестве примера в таблице 2 для различных типов теплообменников показаны массовый показатель  $\varepsilon^m$  и ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи. Значения  $\varepsilon^c$  могут меняться по известным причинам.

Таблица 2

**Характеристики теплообменных аппаратов различных типов**

Тип теплообменника	$\varepsilon^m$ , кг/м <sup>2</sup>	$K$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)
Водоводяной типа ВХД	15...20	580...760
Воздухоохладитель типа ВО	5...8	70...314
Маслоохладитель типа МО	15...20	170...230
ОТОА		Существенно отличаются при стоянке и движении. Определяется расчетным путем
– с лабиринтным каналом	50	
– с сопловым подводом	12...16	

Коэффициент теплопередачи для ОТОА изменяется в широких пределах в зависимости ряда факторов: стоит или движется судно, какой температурный напор достигается в аппарате, какая ориентация поверхности аппарата и т.д. Существуют хорошо апробированные методики, которые позволяют рассчитать  $K$  с учётом указанных факторов.

С использованием введенной ранее величины  $\psi$  можем определить суммарную приведенную площадь теплообменников

$$\sum F_{\text{ПТ}} = \psi F_{\text{ПТ}} + F_{\text{ОТ}},$$

где  $\psi = \psi^c$  или  $\psi^m$ .

Воспользовавшись зависимостями (1) и (2) запишем:

$$\sum F_{\text{ПТ}} = \psi \frac{Q}{K_{\text{ПТ}}(\Delta t - \Delta t_{\text{ОТ}})} + \frac{Q}{K_{\text{ОТ}} \Delta t_{\text{ОТ}}}. \quad (3)$$

Известно, что в случае, если теплопередача осуществляется при вынужденной конвекции теплоносителей, значение коэффициента теплопередачи  $K$  практически не зависит от  $\Delta t$ . Условие достижения минимального  $\sum F_{\text{ПТ}}$

$$\frac{d}{d\Delta t_{OT}} (\sum F_{TP}) = 0. \quad (4)$$

После некоторых преобразований имеем:

$$(\psi K_{OT} - K_{TP}) \Delta t_{OT}^2 + 2K_{TP} \Delta t \cdot \Delta t_{OT} - K_{TP} \Delta t^2 = 0.$$

Таким образом, имеем квадратное уравнение, решение которого легко находится. В случае нахождения судна в неподвижной воде (стоянка судна) теплоотдача ОТОА в забортную воду осуществляется при свободной конвекции. При этом коэффициент теплоотдачи забортной воде, а соответственно и  $K_{OT}$ , зависят от имеющегося  $\Delta t_{OT}$ . Может быть показано, что

$$K_{OT} = k \Delta t_{OT}^{0.3}.$$

Тогда зависимость (3) будет иметь вид

$$\sum F_{TP} = \psi \frac{Q}{K_{TP} (\Delta t - t_{OT})} + \frac{Q}{k \Delta t_{OT}^{1.3}}.$$

С учетом условия минимальности (4) значения  $\sum F_{TP}$  получаем

$$\psi \frac{Q}{K_{TP} (\Delta t - \Delta t_{OT})^2} - 1,3 \frac{Q}{k \Delta t_{OT}^{1.3}} = 0.$$

Выполнив необходимые преобразования находим:

$$\Delta t_{OT}^{2.3} = A (\Delta t - \Delta t_{OT})^2, \quad (5)$$

$$\text{где } A = 1,3 \frac{K_{TP}}{\psi \cdot k}.$$

В результате определение оптимального  $\Delta t_{OT}$  может быть выполнено либо графическим методом, либо методом последовательных приближений.

Для области значений величин  $A = 0,5 \dots 16,0$  и  $\Delta t \leq 120$  °C выполнены необходимые расчеты, в результате чего имеется возможность использовать номограмму (рис. 3) для нахождения оптимального  $\Delta t_{OT}$ .

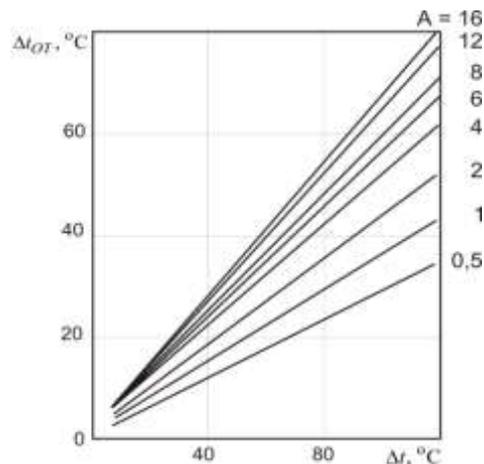


Рис. 3. Номограмма для определения оптимального температурного напора  $\Delta t_{OT}$  в обшивочном теплообменнике

### Обсуждение

В качестве примера, иллюстрирующего реализацию представленного подхода, на рисунке 5 показаны графики изменения суммарной приведенной площади теплообменников системы в зависимости от  $\Delta t_{OT}$ . Минимальное значение  $\sum F_{пр}$  совпадает с расчетным значением, получаемым по зависимости (5).

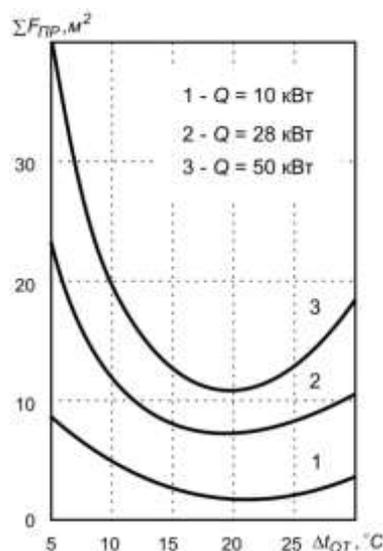


Рис. 4. Зависимость  $\sum F_{пр}$  от  $\Delta t_{OT}$  ( $\Delta t = 35$  °C,  $K_{пр} = 200$  Вт/м²К, расчетное оптимальное  $\Delta t_{OT} = 21$  °C)

Для различных типов судов приоритеты различны. Например, для скоростных судов с динамическими принципами поддержания (суда на подводных крыльях, на воздушной подушке и др.) приоритет дается массовому показателю  $\psi^M$ , а для тихоходных водоизмещающих (танкеры, балкеры и др.) –  $\psi^C$ .

Совершенно очевидно, что в ходе проектирования замкнутой системы охлаждения параметры и условия работы используемого оборудования уточняются. Следует отметить, что предложенный подход может быть успешно использован не только на начальных этапах проектирования, но и на последующих, уже с учетом выполненных уточнений.

### Заключение

Таким образом, получены зависимости, позволяющие для замкнутых двухконтурных систем охлаждения оптимальным образом определить температуру теплоносителя, циркулирующего в ОТОА, с учетом задаваемых приоритетов стоимости или массы оборудования.

### Список литературы:

1. Шурпак В.К. Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов/ В.К. Шурпак // Научно-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2014. – Вып. 37. – С. 51–55.
2. Walter H., Keel Coolers, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.waltergear.com/kc.htm> (дата обращения: 11.11.2018).
3. Specifying a Trawler. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bluewater-trawlers.blogspot.com/2008/11/hull-construction.html> (дата обращения: 12.11.2018).

4. Specialty Gridcooler Keel Coolers. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.fernstrum.com/products/gridcooler-keel-cooler/specialty-coolers> (дата обращения: 13.11.2018).
5. Duramax DuraCooler Patented Streamlined Header Design. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.duramaxmarine.com/heat-duracooler.htm> (дата обращения: 10.11.2018).
6. Drydocking Services. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.diversifiedmarineinc.com/Drydock.htm> (дата обращения: 17.11.2018)
7. Федоровский К.Ю. Замкнутая система охлаждения плавкрана грузоподъемностью 500 т / К.Ю. Федоровский, Н.М. Туриченко // Судостроение. – 1987. – № 12. – С. 15–17.
8. Walter H., W. Witt. «Fortschritte der Ragger- und Schiffbautechnik beim Hopperbagger «Ludwig Franzius» der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung», Schiff und Hafen. – 1965. – № 17. – Pp. 595–610.
9. Bobotek J. «Wymianaciepla w chlodnicach poszyciowych», Budownictwo Okretowe. – 1976. – Pp. 122–124.
10. The International Convention for the Prevention of Pollution of Ships (MARPOL 73/78). [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://marineandmaritimetechnology.blogspot.com/2017/11/summary-of-marpol-international.html> (дата обращения: 08.11.2018).
11. Гарбаненко О.К. оснащение водозаборов морских нефгазодобывающих платформ рыбозащитными устройствами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://helion-ltd.ru/s-m-part-2/3713-2009-10-14-18-33-05/>. (дата обращения: 11.08.2016).
12. Ващинников А.Е. Новые направления в разработке сетчатых рыбозащитных устройств / А.Е. Ващинников, А.А. Васильев, К.В. Илюшин, В.Д. Шульгин // Материалы докладов 4-й Всерос. конф. с международным участием. – Борок: Акварос, 2010. – С. 9–13.
13. Краткая историческая экология: регуляция численности популяций в биоценозах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://helpiks.org/6-1866.html>. (дата обращения: 17.01.2018)
14. Предварительные материалы по оценке воздействия на окружающую среду эксплуатации энергоблока 2 и 3 Калининской АЭС на мощности реакторной установки 104% от номинальной / ООО «Гидротехпроект». – Тверь, 2013. – 333 с.

## TEMPERATURES OPTIMIZATION OF TWO-CIRCUIT CLOSED COOLING SYSTEM OF SHIP'S POWER PLANT

**Konstantin Yu. Fedorovskiy**

*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5345-6851>

**Nadezhda K. Fedorovskaya**

*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

*Annotation. The issues of creating environmentally friendly highly reliable closed-loop cooling systems are considered in the paper. The achievement of these qualities is ensured by the rejection of cooling water intake. The analysis of various coolants of the power installation requiring cooling is carried out. It is shown that for the cooling of a number of coolants it is advisable to create double-circuit cooling systems. This requires the introduction of an additional heat exchanger and the separation of the temperature head between the cooled coolant and seawater. The authors suggest an approach that makes it possible to distribute this temperature head between the circuits optimally. This procedure involves comparing various heat exchangers based on their reduced area. A nomogram is presented to determine the optimal value of the temperature head.*

*Keywords: cooling system, marine power plant, temperature head, heat exchanger, heat transfer coefficient*

### References:

1. Shurpyak V.K., «Consideration of the features of cooling systems in assessing the energy efficiency of ships», *Scientific and Technical, Sat Russian Maritime Register of Shipping*. – 2014. – Issue. 37. – Pp. 51–55.
2. Walter H., Keel Coolers, Web. 11 Nov. 2018 <<http://www.waltergear.com/kc.htm>>

3. Specifying a Trawler. Web. 12 Nov. 2018 <<http://bluewater-tractors.blogspot.com/2008/11/hull-construction.html>>
4. Specialty Gridcooler Keel Coolers. Web. 13 Nov. 2018 <<http://www.fernstrum.com/products/grid-cooler-keel-cooler/specialty-coolers>>.
5. Duramax DuraCooler Patented Streamlined Header Design. Web. 10 Nov. 2018 <<http://www.duramaxmarine.com/heat-duracooler.htm>>.
6. Drydocking Services. Web. 17 Nov. 2018 <<http://www.diversifiedmarineinc.com/Drydock.htm>>.
7. Fedorovsky K. Yu., Turichenko N. M., Closed floating cooling system with a lifting capacity of 500 t, Shipbuilding. – 1987. – No. 12. – S. 15-17.
8. Walter H., Witt W., Fortschritte der Schiffbautechnik beim Hopperbagger «Ludwig Franzius» der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Schiff und Hafen. – 1965. – No. 17. – Pp. 595-610.
9. Bobotek J. «Wymianaciepla w chlodnicach poszyciowych», J. Bobotek, Budownictwo Okretowe. – 1976. – Kwiecien. – Pp. 122-124.
10. The International Convention for the Prevention of Pollution of Ships (MARPOL 73/78). Web. 8 Nov. 2018 <<http://marineandmaritimetechnology.blogspot.com/2017/11/summary-of-marpol-international.html>>.
11. Garbanenko O. K. «Equipping water intakes of offshore oil and gas platforms with fish protection devices», Web. 11 Nov. 2018 <<http://helion-ltd.ru/s-m-part-2/3713-2009-10-14-18-33-05/>>.
12. Vashchinnikov A. E., Vasiliev A. A., Ilyushin K. V., Shulgin V. D. «New directions in the development of mesh fish protection devices», Materials of reports of the 4th All-Russian conf. with international participation. – Borok: Watercolor, 2010. – Pp. 9-13.
13. Brief historical ecology: Regulation of the number of populations in biocenoses. Web. 11 Nov. 2018 <<http://helpiks.org/6-1866.html>>.
14. Preliminary materials on the environmental impact assessment of the operation of power units 2 and 3 of the Kalinin NPP at a reactor plant capacity of 104% of the nominal, Gidrotehproekt LLC – Tver, 2013. – 333 p.

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

**Константин Юрьевич Федоровский**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Энергоустановки морских судов и сооружений», Севастопольский государственный университет» (ФГАОУ ВО «СевГУ»), Морской институт, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. e-mail: fedkonst@rambler.ru

**Надежда Константиновна Федоровская**, аспирант кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений», Севастопольский государственный университет» (ФГАОУ ВО «СевГУ»), Морской институт, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

**Konstantin Yu. Fedorovskiy**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Power Installations of Ships and Structures», Sevastopol State University (FGAOU VO «SevSU»), Maritime Institute, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia

**Nadezhda K. Fedorovskaya**, post-graduate student of the department «Power installations of marine vessels and structures», Sevastopol State University (FGAOU VO «SevSU»), Maritime Institute, 33, Universitetskaya st. Sevastopol, 299053, Russia

Статья поступила в редакцию 18.02.2020 г.

**Научные проблемы  
водного транспорта**

**Вестник ВГАВТ**

**Выпуск 62**  
2020

Формат бумаги 70x180 1/16. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 13,8.  
Заказ 029. 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.

Научные проблемы водного транспорта № 62 2020

Адрес редакции и издателя:  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5

Управление научных исследований  
и инновационной деятельности  
© ВГУВТ, 30.03.2020